

基于滑模变结构的含不平衡负荷微电网控制策略研究

朱鑫¹, 刘俊勇¹, 刘洋¹, 向月¹, 朱国俊², 戴松灵², 成思琪¹, 田昊¹

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 四川省电力公司电力经济技术研究院, 四川 成都 610065)

摘要: 不平衡负荷会增加系统运行电压的不平衡度和谐波畸变率, 影响微电网电能质量。利用滑模变结构控制鲁棒性强、动态响应性好的特点, 将其应用于含不平衡负荷微电网运行控制中。对各系统建立了相关数学模型, 并设计了相应的控制策略, 实现了微电网不同运行模式间的平滑切换。PSCAD/EMTDC 仿真结果表明了该方法的可行性和有效性。

关键词: 微电网; 滑模变结构; 电能质量; 不平衡负荷; 控制策略

Study of micro-grid control strategy contained unbalanced load based on sliding-mode variable structure

ZHU Xin¹, LIU Junyong¹, LIU Yang¹, XIANG Yue¹, ZHU Guojun², DAI Songling², CHENG Siqi¹, TIAN Hao¹

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Economic and Technical Research Institute of Sichuan Electric Power Corporation, Chengdu 610065, China)

Abstract: Unbalanced load increases imbalance and harmonic distortion of system operating voltage, which results in the influence of power quality in micro-grid. Sliding-mode variable structure control is proved to be robust and has plenty of remarkable dynamic response characteristics, so that it could be applied to the micro-grid operation with unbalanced load control. The mathematical model of the system is established, and an appropriate control strategy is designed to achieve a smooth mode-switch among diverse micro-grid operating modes. The experimental results of PSCAD/EMTDC show the feasibility and effectiveness of the proposed approach.

This work is supported by Scientific Collaboration Foundation of Energy-Saving and Emission-Reducing of Small and Medium-sized Enterprises in Sino-European (No. SQ2011ZOF000004).

Key words: micro-grid; sliding-mode variable structure control; power quality; unbalanced load; control strategy

中图分类号: TM464 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)06-0025-08

0 引言

近年来, 集成了各种分布式电源系统和电力电子技术的微电网得到越来越多的关注和研究^[1-2]。通过将较为成熟的分布式电源技术、先进的控制装置及各种类型负荷组合成新型供电系统, 将其以微电网的形式接入大电网, 并使用灵活的控制策略, 可以达到提高电网供电能力和电能质量^[3]的目的。

微电网中大量单相负荷的不对称接入会引起三相电流不对称中性点电压偏移, 造成三相电压不平衡^[4], 并将进一步导致微源逆变器输出电压中含有

基波负序和三次谐波, 从而使输出电流中包含有基波负序电流和三次谐波电流^[5], 并引发电力电子设备的运行失常甚至引起设备损坏。因此, 对含三相不平衡负荷微电网的控制策略进行相关研究是极为重要的。

目前, 在微电网技术研究中尚无针对不平衡负荷控制的通用方法, 现有研究方法主要是从逆变器结构或其控制策略角度进行研究。文献[6-7]提出了一种能适应微电网不同电能质量需求的多功能逆变器, 实验结果证明其对不平衡负荷及非线性负荷有良好的控制效果, 但其补偿电流求解过程繁琐, 过多的变量引入也使得控制系统设计较为复杂。文献[8]总结了现今针对不平衡负荷的主要控制方式, 包含跟踪法、补偿法和滑模变结构控制等。跟踪法抗

基金项目: 中欧中小企业节能减排科研合作资金项目 (SQ2011ZOF000004)

不平衡能力低；补偿法的算法复杂，控制器设计困难；滑模变结构控制算法灵活高效但缺乏实验验证。文献[9]尝试将滑模变结构控制方法应用于不平衡负荷控制，但仅对带不平衡负荷的单个微源进行了仿真研究，未验证将滑模变结构控制策略应用于含不同分布式电源微电网中的可行性。

本文综合考虑一种含不平衡负荷微电网网络拓扑^[10]，利用滑模变结构控制对系统参数摄动和外部扰动具有强鲁棒性的特点，实现了微源逆变器输出电压的对称性，同时结合 PQ、V/f 控制^[11]使微电网在保证供电质量的前提下实现各微源最大功率输出及微电网不同运行模式间的平滑切换。

1 微电网建模

建立微电网模型，结构如图 1 所示。微电网通过断路器 BRK0 接入主网。微电网内包含光伏发电、风机、微型燃气轮机等微源以及三相平衡负荷和不平衡负荷。其中光伏、风力机等采用 PQ 控制的微源本地负荷为三相平衡负荷，而本地负荷为不平衡负荷的微源则采用滑模变结构控制。

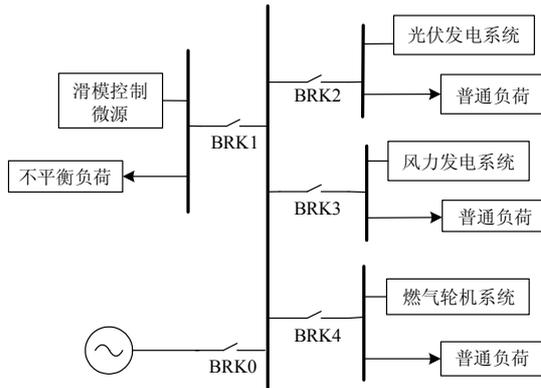


图 1 微电网结构

Fig. 1 Architecture of the micro-grid

1.1 光伏发电系统模型

光伏发电系统^[12]由光伏发电单元、boost 斩波电路、逆变环节构成，其中光伏发电单元输出的电流模型如式(1)。

$$I_{\text{out}} = n_1 \left\{ I_{\text{ph}} - I_0 \left[\frac{q \cdot U_{\text{out}}}{n_2 A K T} - 1 \right] \right\} \quad (1)$$

式中： U_{out} 、 I_{out} 分别为光伏阵列的输出电压、输出电流； n_1 、 n_2 分别为光伏阵列中并联光伏电池数、串联光伏电池数； I_{ph} 为与日照强度成正比例的光生电流； I_0 为反向饱和电流(数量级为 10^{-4})； K 为波尔

茨曼常数(1.38×10^{-23} J/K)； A 为 PN 结理想因子； T 为绝对温度； q 为电子电荷(1.6×10^{-19} C)。其中

$$I_{\text{ph}} = \left[I_s + K_T (T - 298) \right] \frac{S_r}{1000} \quad (2)$$

式中： I_s 为光伏电池的短路电流； S_r 为光照强度； K_T 为温度系数。

此外，为充分利用光能，在光伏发电系统中采用扰动观察法^[13]以实现最大功率点追踪。通过不断对光伏电池的输出电压施加扰动，观察光伏电池的输出功率并不断调整其输出功率从而达到最大功率点跟踪。

在光伏发电单元，采用 boost 斩波电路抬升光伏电池出口直流电压，使光伏发电单元出口电压能够满足逆变器逆变电压的要求。同时使逆变器能在较宽的输入带得到稳定的输出电压，提高逆变器的工作范围^[14]。

1.2 风力发电系统模型

风力发电系统由风力机发电单元和整流逆变部分构成，其中风力机系统的输出功率为^[15]

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \pi R_w^2 V^3 C_p \quad (3)$$

式中： ρ 为空气密度； R_w 为风轮机片的半径； V 为风速； C_p 为风能利用系数，是风轮机叶尖速比和桨叶节距角的函数， $C_{p\text{max}} = 0.593$ 。

输出转矩： $T_e = \lambda \cdot P_w$

式中：叶尖速比 $\lambda = \frac{\omega_w g R_w}{V}$ ； ω_w 为叶片旋转的角速度。

1.3 燃气轮机系统模型

微型燃气轮机系统采用 Rowen 提出的单轴单循环重负荷燃气轮机模型^[16-17]。该单轴 MT 模型主要由温度、速度、加速度以及燃料等控制系统组成。模型中排气温度函数 F_C 和转矩函数 F_T 分别为

$$\begin{aligned} F_C &= 950 - 700(1 - W_f) + (1 - \omega) \\ F_T &= 1.3(W_f - 0.23) + 0.5(1 - \omega) \end{aligned} \quad (4)$$

式中： ω 为燃机转速； W_f 为燃料量信号。

2 控制策略

本文采用并网和孤岛两种微电网工作方式作为背景对控制策略加以研究。并网运行时，微电网内光伏、风力机、微型燃气轮机通过逆变器以恒功率控制方式为本地负荷供电，大电网作为功率缺额补偿，以提供电压和频率支撑。当微电网计划性孤岛

其 dq 轴参考电流生成示意图如图 5(其中 V_{dref} 为光伏发电单元 MPPT 算法输出参考电压)。

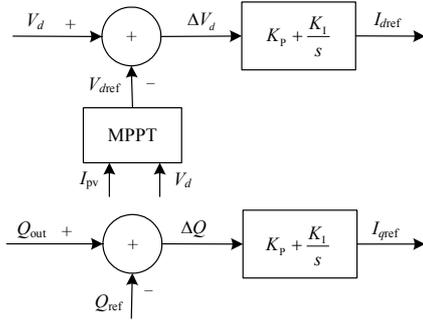


图 5 恒直流电压恒无功功率控制器结构
Fig. 5 Diagram of PV_{dc} controller

以上两种控制策略将应用于微电网的稳态运行时段以实现微电网运行模式的无缝切换, 而暂态过程则由 PQ 与 V/f 控制策略协调控制。

2.3 微源运行模式切换策略

为保证微电网运行模式的平滑切换, 在运行模式切换的过程中按照主从控制方式在微电网中选择稳定的微型燃气轮机作为切换过程中的主电源。微电网在孤岛模式下运行时主电源仍采用 PQ 控制方式, 微电网内电压频率交由滑模变结构控制器支撑。在收到并网运行的指令时, 主电源首先从 PQ 控制方式转变为 V/f 控制方式, 通过 PI 控制器调整微电网与主网功角差, 使之趋近主网功角。当其一致时实现微电网并网, 控制模式转为 PQ 控制, 此时主网微电网内电压频率的稳定由主网维持。

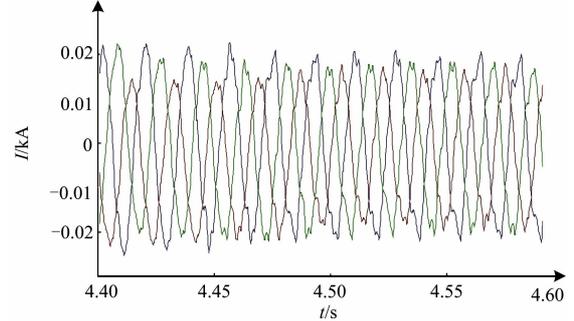
3 仿真与分析

在 PSCAD/EMTDC 中建立了结构如图 1 所示的微电网模型。微型燃气轮机系统、光伏发电系统、风力发电系统的发电部分采用 PSCAD/EMTDC 内自带的永磁感应发电机模型^[21]。相关实验参数如表 1 所示。

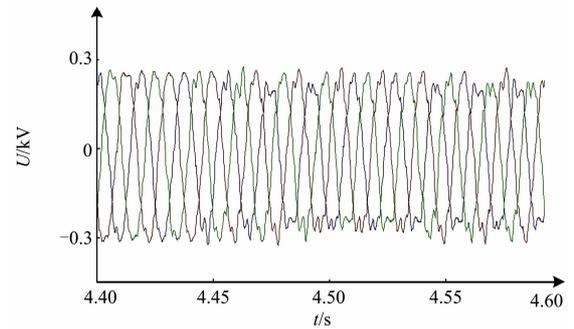
表 1 系统参数

Table 1 System parameters	
参数	数值
电感 L/mH	3
电容 $C/\mu\text{F}$	160
普通三相负荷/ Ω	30
三相不平衡负荷/ Ω	30、20、20
开关频率/ kHz	6 000
ε_1	5
k	8 000
$c_1、c_2$	3 000

3.1 滑模变结构控制与普通控制策略仿真结果对比
常规 PQ 控制方式带不平衡负荷的仿真结果如图 6 所示。



(a) 带不平衡负荷电流图



(b) 带不平衡负荷电压图

图 6 采用 PQ 控制微源带不平衡负荷电压电流图

Fig. 6 Voltage and current waveforms using PQ control

在 4.4~4.6 s 时不平衡负荷靠近采用 PQ 控制的微源接入。从图 6(a)和图 6(b)中可知, 受不平衡负荷的影响, 微源逆变器出口电压失衡现象严重, 三相电压波形不规整。电压不平衡度^[22]在 16.9%左右, 严重超出电力系统安全运行规定的电压不平衡度要求范围^[23]。采用滑模变结构的微源带不平衡负荷的仿真结果如图 7 所示。

从图 7(a)、图 7(b)可以看出, 采用滑模变结构控制的微源接入后(0.8~1.0 s), 系统电压不平衡度从 6.9%下降到 0.078%。由此可以看出, 滑模控制器的接入消除了不平衡负荷对微电网和电能质量的影响, 优化了微电网和主网的供电质量, 保证了微电网和主网内设备的安全运行。微电网频率响应仿真结果如图 8 所示。

从图 8 中亦可以看出, 采用滑模变结构控制调节不平衡负荷, 系统频率在 49.95~50.10 Hz 之间波动, 满足规定系统频率安全波动范围^[24]。

3.2 微电网运行模式切换仿真

设置仿真指令: 5.5 s 时微电网与主网断开, 微电网进入孤岛运行模式, 在 6.5 s 时发出重合闸指令。主网与微电网相角情况仿真结果如图 9 所示。

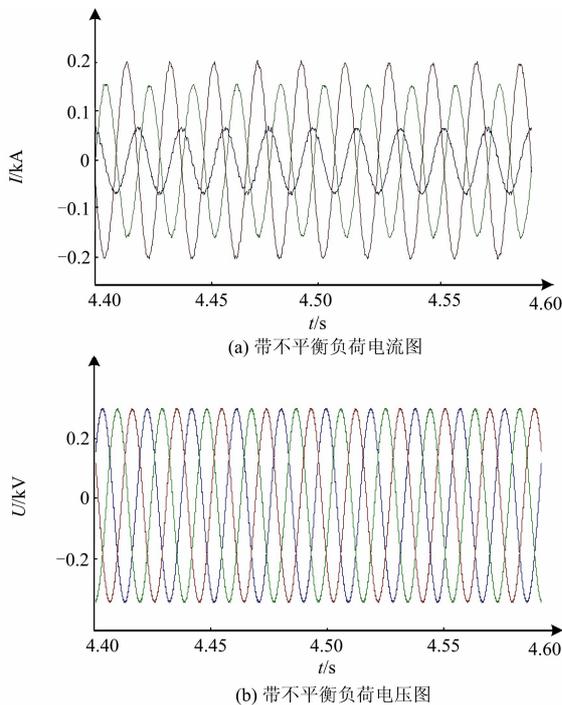


图 7 采用滑模变结构的微源带不平衡负荷电压电流图
Fig. 7 Voltage and current waveforms using sliding mode

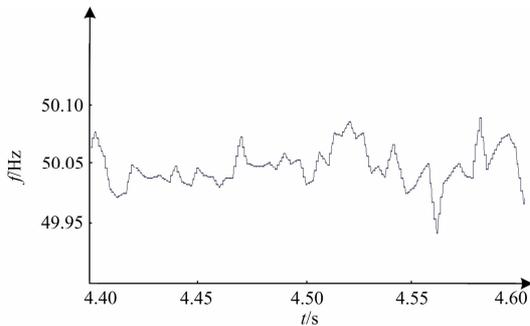


图 8 微电网频率响应
Fig. 8 Frequency of micro-grid

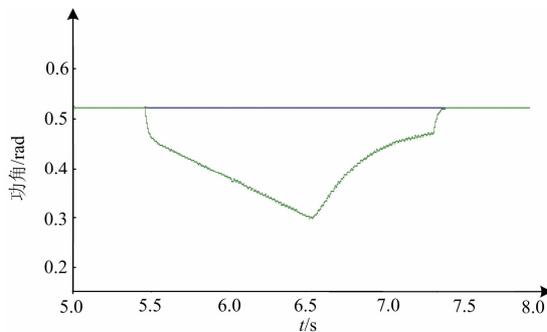


图 9 主网与微电网相角图
Fig. 9 Power-angle of micro-grid and grid

从图 9 可以看出，在并网运行时，微电网内的

相角与大电网一致，网内电压和频率由大电网提供支撑。6.5 s 后，微电网转入孤岛运行，微电网内的电压和频率主要由采用滑模变结构控制的微源支撑，网内功角由 0.52 rad 滑至 6.5 s 时的 0.3 rad。在 6.5 s 时微电网收到重合闸指令，微电网内功角在主源的调节下逐步从 0.3 rad 调整为 0.52 rad, 历时 1 s。此时(7.38 s)，微电网由孤岛运行模式转至并网运行模式。微电网与主网并网电压仿真结果如图 10 所示。

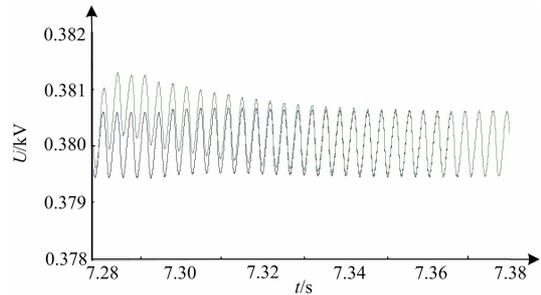


图 10 微电网与主网并网电压
Fig. 10 Connected voltage of micro-grid and grid

由图 10 可知，微电网在由并网运行转入孤岛模式后，网内电压有短时升高，而收到并网指令后，主源将根据微电网与主网幅值差调节微电网内电压幅值降低至与主网一致，使微电网与主网能实现运行模式间的平滑切换。

4 总结

本文提出将滑模变结构控制应用于微电网不平衡负荷控制，实现了不平衡负荷的就近消纳，减少了其对微电网内电能质量的影响，降低了微电网电压的不平衡度。滑模控制器具有设计简单、鲁棒性强、动态响应性好等优点，是一种对不平衡控制比较有效、简易的方法。此外，本文搭建了包含光伏发电系统、微型燃气轮机系统、风力发电系统的微电网仿真模型，提出了将滑模控制与 PQ、V/f 控制结合应用于各微源逆变侧的控制策略。算例证明了该控制策略的有效性和可行性。在本文中，三相不平衡负荷仅由单相线性负荷构成，将该方法适用于含非线性负荷的情况有待进一步验证。

参考文献

[1] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇, 等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 100-107.
LU Zongxiang, WANG Caixia, MIN Yong, et al. Overview on microgrid research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 100-107.
[2] AREFIFAR S A, MOHAMED Y A R I, EL-FOULY T H

- M. Optimum microgrid design for enhancing reliability and supply-security[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(3): 1567-1575.
- [3] BLAABJERG F, TEODORESCU R, LISERRE M, et al. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1398-1408.
- [4] 池源. 含非线性及不平衡负荷的微电网控制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
CHI Yuan. Control strategies for microgrid with non-linear and unbalanced loads[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [5] 张明锐, 杜志超, 王少波, 等. 高压微网运行模式切换控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 153-162.
ZHANG Mingrui, DU Zhichao, WANG Shaobo, et al. Control strategies of high-voltage microgrid for operation modes switching[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 153-162.
- [6] 曾正, 赵荣祥, 杨欢, 等. 多功能并网逆变器及其在微电网电能质量定制中的应用[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 58-67.
ZENG Zheng, ZHAO Rongxiang, YANG Huan, et al. A multi-functional grid-connected inverter and its application to customized power quality of microgrid[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 58-67.
- [7] 陈新, 姬秋华, 刘飞. 基于微网主从结构的平滑切换控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 163-170.
CHEN Xin, JI Qiuhua, LIU Fei. Smooth transferring control method of microgrid based on master-slave configuration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 163-170.
- [8] 丁明, 马凯, 毕锐. 基于多代理系统的多微网能量协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 1-8.
DING Ming, MA Kai, BI Rui. Energy coordination control of multi-microgrid based on multi-agent system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 1-8.
- [9] 曾正, 赵荣祥, 杨欢. 带隔离变压器的并网逆变器的降阶模型及滑模变结构控制[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 47-53.
ZENG Zheng, ZHAO Rongxiang, YANG Huan. Reduction model and sliding mode variable structure control for grid-connected inverters with isolation transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 47-53.
- [10] 周念成, 池源, 王强钢. 含非线性及不平衡负荷的微电网控制策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 61-66.
ZHOU Niancheng, CHI Yuan, WANG Qianggang. Control strategies for microgrid containing non-linear and unbalanced loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 61-66.
- [11] FREDE B, REMUS T, MACRO L, et al. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1398-1409.
- [12] 苏虎, 曹炜, 孙静, 等. 基于改进下垂控制的微网协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 92-98.
SU Hu, CAO Wei, SUN Jing, et al. Microgrid coordinated control strategy based on improved droop control[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 92-98.
- [13] 张超, 何湘宁. 短路电流结合扰动观察法在光伏发电最大功率点跟踪控制中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 98-102.
ZHANG Chao, HE Xiangning. Short-current combined with perturbation and observation maximum-power-point tracking method for photovoltaic power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20): 98-102.
- [14] SECHILARIU M, WANG Bao-chao, LOCMEN F. Building integrated photovoltaic system with energy storage and smart grid communication[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 60(4): 1607-1618.
- [15] 李彦林, 王明彦, 郑载满. 具有电压补偿的微网逆变器控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 41-47.
LI Yanlin, WANG Mingyan, ZHEGN Zaiman. Microgrid inverter control with voltage compensation function[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 41-47.
- [16] ROWEN I. Simplified mathematical representations of heavy-duty gas turbines[J]. Journal of Engineering for Power, 1983(105): 865-869.
- [17] 李建军, 吴政球. 微型燃气轮机分布式发电系统的建模和仿真[J]. 湖南大学学报, 2010, 37(10): 57-62.

- LI Junjun, WU Zhengqiu. Modeling and simulation of micro-gas turbine distributed generation system[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2010, 37(10): 57-62.
- [18] 周洁, 罗安, 陈燕东, 等. 低压微电网多逆变器并联下的电压不平衡补偿方法[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 412-418.
ZHOU Jie, LUO An, CHEN Yandong, et al. Voltage unbalance compensation for low-voltage microgrid with multi parallelly connected inverters[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 412-418.
- [19] 赵葵银. PWM 整流器的模糊滑模变结构控制[J]. 电工技术学报, 2006, 21(7): 49-53.
ZHAO Kuiyin. PWM rectifier with fuzzy sliding mode variable structure control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(7): 49-53.
- [20] PHAKAMACH P, AKKARAPHONG C. An optimal feedforward integral variable structure controller for the electrohydraulic position servo control systems[C] // IEEE TENCON 2004, 2004 IEEE Region 10 Conference, 2004, 4: 459-462.
- [21] 杨秀, 臧海洋, 靳希. 微型燃气轮机并网发电系统的仿真分析[J]. 华东电力, 2011, 39(5): 818-821.
YANG Xiu, ZANG Haiyang, JIN Xi. Simulation and analysis of microturbine generation system for grid-connected operation[J]. East China Electric Power, 2011, 39(5): 818-821.
- [22] 范元亮, 苗逸群. 基于下垂控制结构微网小扰动稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 1-8.
FAN Yuanliang, MIAO Yiqun. Small signal stability analysis of microgrid droop controlled power allocation loop[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(4): 1-8.
- [23] PILLAY P, MANYAGE M. Definitions of voltage unbalance[J]. IEEE Power Engineering Review, 2001, 21(5): 49-51.
- [24] 中国标准出版社. 电能质量标准汇编[M]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
-
- 收稿日期: 2014-06-09; 修回日期: 2014-08-04
- 作者简介:
- 朱鑫(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为分布式发电分析与控制; E-mail: 626309189@qq.com
- 刘俊勇(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力市场、电力系统稳定与控制、分布式发电及智能电网。
- (编辑 魏小丽)