

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180650

10 kV 数字物理混合仿真扰动试验系统设计

王金浩¹, 钟佩军², 雷达¹, 孙建军², 常潇¹

(1. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西 太原 030001; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 传统电能质量扰动试验系统不能直观反应实际电网扰动, 也不能用于测试实际电网扰动下并网设备的运行特性。对此提出一种 10 kV/3 MVA 数字物理混合仿真扰动试验系统设计方法。该方法能够在实验室环境下实现电力系统运行模拟, 可用于电网故障下并网设备的特性研究; 同时本扰动试验系统也能模拟基于波形特征描述的电能质量问题。提出了数字物理混合扰动试验系统的总体框架, 功率接口为级联 H 桥式背靠背拓扑, 在逆变侧采用比例+重复控制模拟数字侧仿真波形, 仿真结果证明所提出的设计方案的可行性。

关键词: 数字物理混合仿真; 电能质量; 扰动试验系统; 功率接口; 级联 H 桥

Design of 10 kV digital-physical hybrid simulation disturbance test system

WANG Jinhao¹, ZHONG Peijun², LEI Da¹, SUN Jianjun², CHANG Xiao¹

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030001, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The traditional power quality disturbance test system can neither directly reflect the actual power grid disturbance, nor can be used to test the operation characteristics of grid-connected equipment in the case of the actual grid disturbance. In this paper, a design method of 10 kV/3 MVA digital-physical hybrid simulation disturbance test system is proposed, which can be used to simulate the operation of power system in laboratory environment and study the characteristics of grid-connected equipment under grid fault. At the same time, the disturbance test system can also simulate the power quality problem based on waveform feature description. In this paper, the general framework of the digital-physical hybrid disturbance test system is presented. The power interface is a cascaded H-bridge back-to-back topology. To analogize digital side simulation waveform output, the inverter is controlled by proportional control and repetitive control in output sides. The simulation results show the feasibility of the proposed design scheme.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277137).

Key words: digital-physical hybrid simulation; power quality; disturbance test system; power interface; cascade H bridge

0 引言

随着电力电子技术的进一步发展, 近年来风力发电和太阳能光伏发电等新能源发电在电力系统占比持续增加^[1-2], 在输配电方面高压直流输电技术和柔性交流输电技术也取得了重要的应用成果, 在负荷侧出现了电动汽车, 充电状态的电力电子储能设备等电力电子负荷, 电力电子设备的大量投入改变了电力系统结构也带来大量的谐波^[3-7]。同时电力系统由于自身设备故障, 操作故障或外部原因往往会

造成电力系统电压非正弦运行, 产生电力系统电压暂降, 三相电压不平衡等问题; 在电力系统有功功率不平衡时往往会出现系统频率偏差等问题。为了提高电能质量, 必须对电力系统中存在的电能质量问题进行治理, 目前已有诸多电能质量治理设备如: 针对电压暂降的动态电压恢复器(DVR), 针对系统无功不足进行补偿的静止无功补偿器(SVC)和静止同步补偿器(STATCOM), 保证电力系统可靠运行的不间断电压(UPS), 治理电力系统谐波的有源电力滤波器(APF)。

在上述设备投入电网之前, 需要测试设备接入电网的治理能力。目前, 基于电力系统的全数字仿

真能够便捷的反应设备在系统中的运行状态,但由于建模技术限制,仿真效果与实际存在一定差别。也有一些文献提出了动态物理模拟如文献[8]提出了基于 DSP 与 FPGA 的谐波发生器,其局限在于只能应用于谐波治理设备性能测试试验。文献[9]提出了一种可以实现 10 kV 多种类型电能质量问题模拟的扰动系统建设方案,文献[10]提出一种可模拟各类电压和电流扰动的试验平台,但均存在扰动系统容量较小,不能满足大容量设备测试要求。数字物理混合仿真技术结合了数字仿真技术和物理仿真技术的优点,可以更直观、更准确地模拟实际电力设备在电力系统中的运行情况,是现代电力系统仿真的一种重要方式。文献[11]设计了基于 RTDS 的电能质量扰动试验系统,能够测试 APF 接入系统后的运行特性。文献[12]提出了一种数模混合仿真系统,但此系统仅适用于 400 V/50 kVA 设备仿真试验。目前基于数字物理混合仿真技术的扰动试验系统,存在功能简单,电压等级低,容量小等问题难以满足实际试验需要。

对此本文提出一种 10 kV/3 MVA 数字物理混合仿真扰动试验系统设计方案;基于 RTDS 平台在数字侧采用数字仿真技术模拟实际配电网,在物理侧采用实际电气设备,通过高压大功率接口连接数字系统与物理系统。基于本扰动试验系统能够测试 10 kV/3 MVA 电气设备在电网中的运行工况。本文将从数字物理混合仿真扰动试验系统的总体结构,数字物理混合仿真接口算法,功率接口拓扑及控制,数字侧仿真设计讲述本扰动试验系统设计方案,最后通过仿真验证了本文提出的数字物理混合仿真试验系统的可行性。

1 试验系统框架

数字物理混合仿真系统根据接口交互量不同可以分为功率硬件在环(PHIL)和控制硬件在环(CHIL),本文所提扰动试验系统实质上是一种功率硬件在环仿真系统。与传统全数字仿真试验系统相比,本文所提试验系统可以更真实地模拟实际电网电能质量扰动。相比与物理仿真试验系统,本文所提系统能够更便捷地修改扰动试验系统参数。本文试验系统主要由两部分组成:RTDS 实时仿真器和高压大容量扰动源。在 RTDS 实时仿真器搭建中配电网模型模拟实际配电网的运行,并将配电网的实际运行信息输出到高压大容量源的控制器,由控制器控制高压大功率源产生与数字系统中测试设备接入点一致的电压。高压大容量试验电源的重点在于其电能变换电路拓扑设计,由于其作用是模拟 RTDS 数字仿

真输出的节点电压信号,用于连接数字系统与物理系统,因此也称其电路拓扑为功率接口。采集测试设备的电流信号通过 GTDI 板卡传送到 RTDS 数字系统,实现数字系统与物理系统之间的信号交换。图 1 为本文提出 10 kV/3 MVA 的数字物理混合仿真试验系统基本原理图。交流电源作为功率接口能量的来源,与被测试设备进行功率交换。RTDS 数字仿真部分为控制器提供实时电压信号。

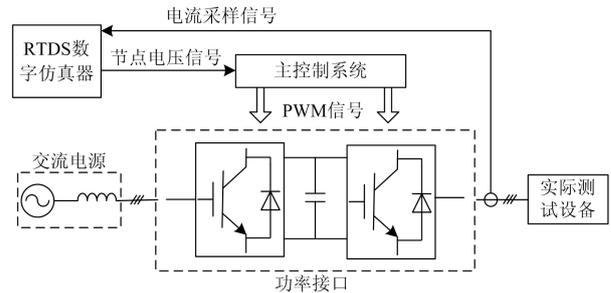


图 1 数字物理混合仿真扰动试验系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of digital-physical hybrid simulation disturbance test system

2 功率接口

2.1 功率接口算法

接口算法其作用是处理数字仿真系统与实际接入装置之间的信息交互,目前国内外主要的接口算法有:阻尼阻抗法,时变一阶近似模拟法,传输线模拟法,部分电路复制法和理想变压器模型法^[13-15]。理想变压器模型算法简单方便,能够较好反应实时数字仿真系统与物理仿真系统之间的信号交换。根据接口类型不同,理想变压器模型算法可以分为电压型接口算法和电流型接口算法^[16-17],本文扰动试验系统主要是模拟电力系统节点电压,因此在功率接口算法上采用的是电压源理想变压器模式算法。其原理图如图 2 所示。将数字仿真部分等效为戴维南电路,考虑到实际装置可能是有源设备,因此用诺顿等效电路表示实际装置,若为无源设备将等效电流源置零即可。等效模型的数字侧等效节点电压如式(1)所示。式中: u_s 是数字仿真部分戴维南等效电源; Z_s 是数字仿真部分戴维南等效阻抗; u_1 表示数字仿真部分输出电压; i_1 是数字侧仿真部分的输出电流。

$$u_1 = u_s - i_1 \times Z_s \quad (1)$$

物理侧仿真系统电流方程所式(2)所示。其中: i 是物理侧诺顿等效模型的等效电流源; Z_L 是物理侧诺顿等效阻抗; u_2 是物理侧端口电压; i_2 是物理侧输入电流。

$$i_2 = \frac{u_2}{Z_L} - i \quad (2)$$

端口条件如式(3), 式中 δ 表示信号采样、信号转换、功率接口等过程的等效延时时间。

$$\begin{cases} u_2 = u_1(t-\delta) \\ i_2 = i_1 \end{cases} \quad (3)$$

因此采用电压型理想变压器模型算法, 将数字物理接口等效为一个变比为 1:1 的变压器模型, 实现数字仿真系统与物理仿真系统的连接。

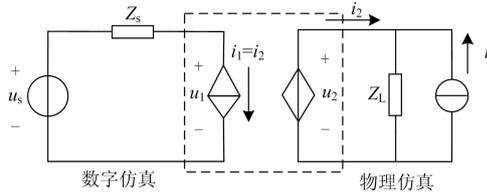


图 2 功率接口的理想变压器模型等效原理图

Fig. 2 Equivalent schematic diagram of ideal transformer model for power interface

2.2 功率接口拓扑及控制

2.2.1 功率接口拓扑

RTDS 数字仿真器中设备接入点的电压输出需要通过高压大容量扰动源实现, 本文提出的扰动试验系统适用于 10 kV 电压等级电力设备性能测试试验, 由于单个 IGBT 的电压等级限制, 不能采用简单的电路拓扑跟踪 RTDS 数字仿真系统的输出, 目前适用于高压大功率系统的拓扑, 主要有飞跨电容型逆变电路^[18]、中点箝位式逆变电路^[19]和模块化多电平电路等^[20]。本文采用 H 桥级联式背靠背电路作为功率接口的主拓扑, 在整流侧和逆变侧均采用带有反并联二极管的 H 桥全控电路, 能够实现交、直流侧在四象限可控运行, 每个功率单元均可实现能量的双向流动, 即能量既可从试验电压侧流向测试设备, 又可从测试设备侧流向试验电源, 功率接口的单相主拓扑如图 3 所示。主要由 N 个背靠背功率单元的逆变侧级联而成。电路左边是一个副边多绕电力变压器, 其原边接交流电源, 副边输出电压 u_{s1} 、 u_{s2} 、 \dots 、 u_{sN} 作为功率单元整流侧输入的交流电压; L_1 、 L_2 、 \dots 、 L_N 为功率单元整流侧的输入滤波电感; C_1 、 C_2 、 \dots 、 C_N 为功率单元直流侧电容, 为保证每个功率单元直流侧电压一致, 可以在每个电容上并联均压电阻。 u_0 是经 LC 滤波器后扰动试验系统输出的交流电压。图 4 是功率单元的拓扑电路, 其中 R_x 是直流侧均压电阻, 其作用是保证功率单元逆变侧电容电压一致。

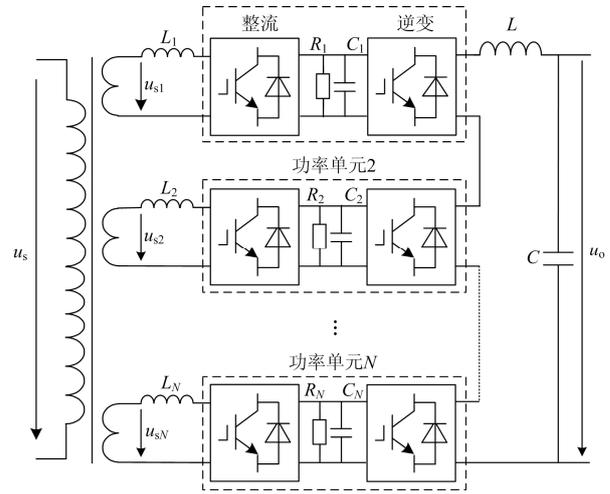


图 3 基于 H 桥级联型逆变器的电能质量试验电源单相主拓扑

Fig. 3 Single-phase main topology of power quality test power supply based on H-bridge cascaded inverter

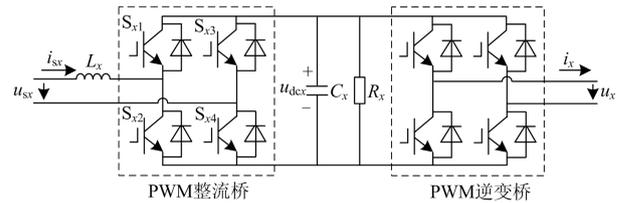


图 4 背靠背功率单元拓扑结构

Fig. 4 Topology of back-to-back power units

2.2.2 整流侧控制策略

背靠背功率单元整流侧作用是保证直流侧电压在逆变侧正常运行所需的范围内。同时为了降低高压大功率试验源对接入电网的影响, 本文同时采用高功率因数控制, 减少高压大功率试验源消耗的无功功率。

每个功率单元整流侧处于相同的工作状态, 可以对每个功率单元整流侧采用相同的控制方式, 如图 5 所示, 是单个功率单元整流侧的控制原理图。考虑到高压大功率源运行时直流侧电压存在的二倍频波动, 直流侧电容电压经过周期求平均后再与参考值进行比较。为保证功率因数, 设计了功率因数控制环, 采样得到变压器副边绕组电压和电流计算得到无功功率 Q_{gi} , 再将计算得到的无功功率与无功功率给定值进行比较。直流电压环和功率因数环均采用 PI 控制, 电流内环采用比例控制, 同时引入了电压前馈控制提高控制速度, 减少功率接口延时时间。

生器的输入为：基波正序电压有效值+基波负序电压有效值+正序电压 2 至 50 次谐波有效值+电压基准频率+电压模式命令。数字仿真器输出为电压源输出指令。数字仿真器的实现公式为

$$u_r = u_{1m+} \sin 2\pi ft + u_{1m-} \sin 2\pi ft + \sum_{h=2}^{50} u_{hm} \sinh 2\pi hft \quad (10)$$

3.2 基于电网故障模拟

在 RTDS 当中进行配电网仿真建模，建立配电网的模型，通过功率接口将待测试的电力设备接入电网当中。在数字仿真中设置配电网故障，通过功率接口模拟故障时测试设备接入点电压，实现故障下电网电能质量扰动模拟。

4 试验

基于 Matlab/Simulink 平台搭建仿真试验系统模型，对数字物理混合扰动试验系统方案进行基于波形特征输出和基于电网故障模拟的仿真验证。图 8—图 12 分别是基于波形特征模拟的电压谐波、电压波动、三相不平衡、相位跳变、电压变频的功率接口输出电压波形。各类扰动情况下扰动系统输出与数字侧给定值如表 1 所示。由表 1 可知，功率接口输出能够准确的跟踪数字仿真侧的给定值。设置 0.25 s 后电压幅值按正弦波动，图 13 是电压幅值正弦波动时，功率接口输出电压波形，由输出波形知

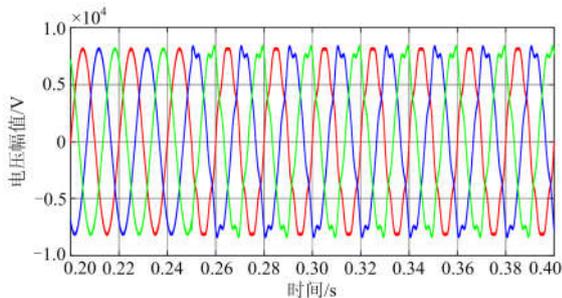


图 8 5%的 5 次谐波+5%的 7 次谐波
Fig. 8 5% 5th harmonic+ 5% 7th harmonic

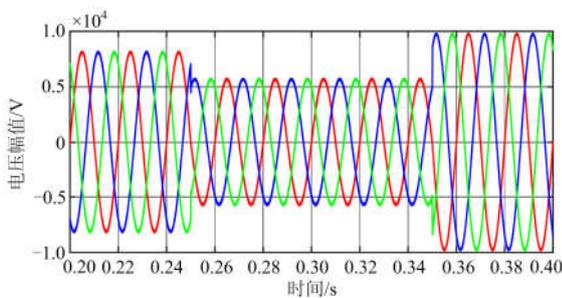


图 9 电压暂降、暂升
Fig. 9 Voltage sag and swell

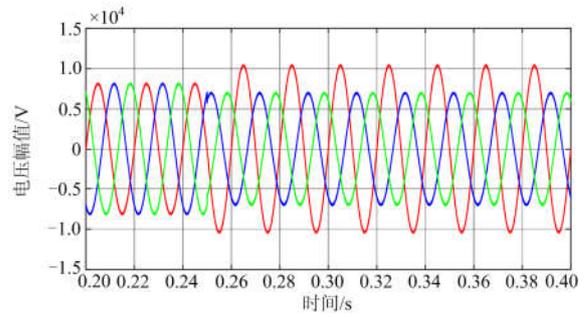


图 10 14%负序+14%零序扰动
Fig. 10 14% negative sequence voltage +14% zero sequence voltage disturbance

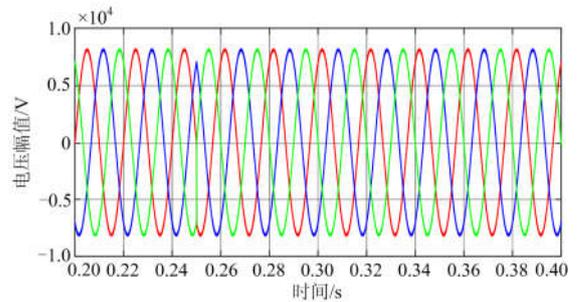


图 11 电压相角跳变
Fig. 11 Voltage phase angle jump

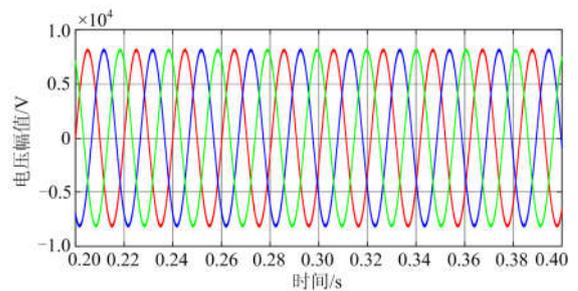


图 12 电压变频
Fig. 12 Voltage frequency conversion

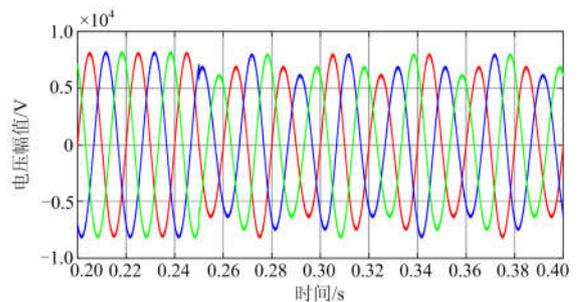


图 13 电压闪变
Fig. 13 Voltage flicker

道在 0.25 s 后输出电压幅值按正弦变化，可用于模拟电网电压闪变。

表 1 基于波形特征仿真试验结果

Table 1 Simulation results based on waveform characteristics			
扰动类型	数字侧给定值	扰动系统输出值	
谐波	5 次	5%	4.96%
	7 次	5%	4.97%
电压波动	暂降	30%	29.994%
	暂升	20%	19.998%
三相不平衡	负序	14%	13.93%
	零序	14%	13.94%
相角跳变/(°)	60.0	60.05	
电压变频/Hz	49.0	49.1	

图 14、图 15 是模拟电网故障下的扰动试验系统输出电压, 图 14(a)是电网发生三相短路故障时, 物理侧输出电压, 图 14(b)是三相短路故障时 A 相数字侧与物理侧输出电压比较。图 15(a)是电网 A 相断线故障下, 物理侧输出电压, 图 15(b)是 A 相断线故障时 A 相数字侧与物理侧电压输出对比。可以看出电网短路故障和断线故障下物理侧均能准确地跟踪数字侧输出电压。

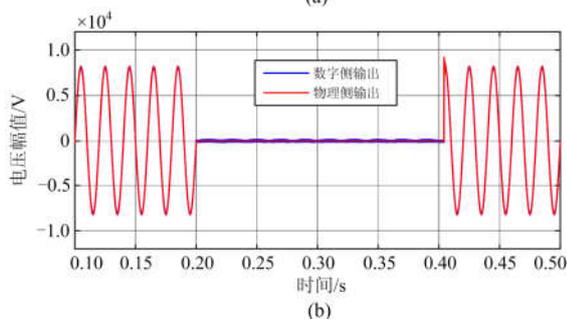
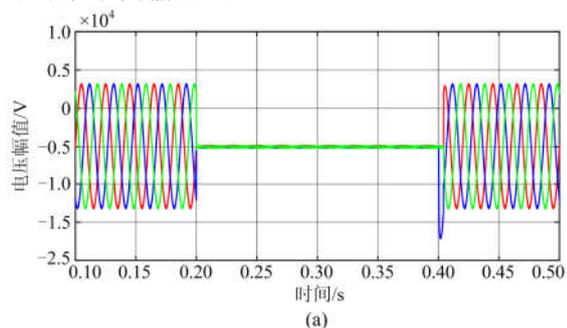


图 14 三相短路故障输出

Fig. 14 Output of three-phase short-circuit fault

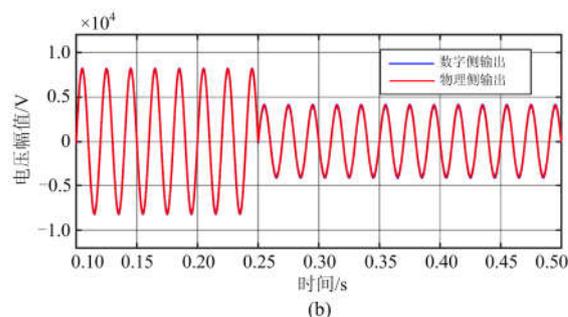
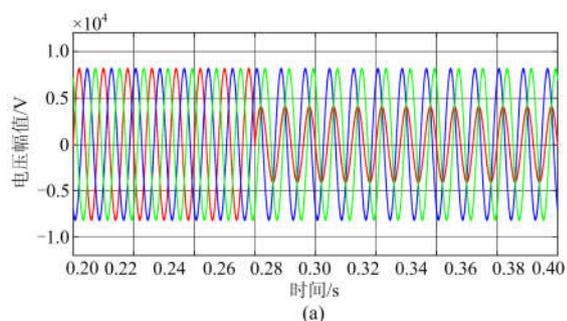


图 15 单相断线故障输出

Fig. 15 Output of single-phase break

5 结论

本文提出了一种基于数字物理混合仿真技术的扰动试验系统设计方案, 数字侧建立实际电网模型, 物理侧采用实际装置, 通过功率接口连接数字部分与物理部分。仿真结果表明: 本文提出的设计方案既能有效模拟基于波形特征描述的电能质量问题, 也能准确模拟配电网故障时设备接入点电压。可以用于测试各类电能质量问题及各类电网故障对系统中电气设备运行的影响, 为研究电网电能质量扰动时电气设备运行状态提供了试验平台, 但由于级联功率单元模块数目的限制, 本扰动试验方案仅适用于 10 kV/3 MVA 的电气设备性能测试试验, 增加级联功率接口模块数目本扰动试验系统方案可应用于更高电压等级和更大容量电气设备性能测试试验。

参考文献

- [1] 杨金强. 风力和太阳能光伏发电现状及发展趋势初探[J]. 科技创新与应用, 2017(31): 188-190.
YANG Jinqiang. A preliminary study on the current situation and development trend of wind and solar photovoltaic power generation[J]. Technology Innovation and Application, 2017(31): 188-190.
- [2] 梁双, 胡学浩, 张东霞, 等. 光伏发电置信容量的研究现状与发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 101-107.
LIANG Shuang, HU Xuehao, ZHANG Dongxia, et al. Research status and development trend of photovoltaic confidence capacity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19): 101-107.
- [3] 陈炜, 艾欣, 吴涛, 等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 26-32, 39.
CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Review on the influence of PV grid-connected generation system on power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26-32, 39.
- [4] 李升, 姜程程, 赵之瑜, 等. 分布式光伏电站接入低压配电网系统暂态电压稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 67-72.
LI Sheng, JIANG Chengcheng, ZHAO Zhiyu, et al.

Study on transient voltage stability of distributed photovoltaic power plant connected to low voltage distribution network system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 67-72.

[5] 段庆, 孙云莲, 张笑迪, 等. 电动汽车充电桩选址定容方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 88-93. DUAN Qing, SUN Yunlian, ZHANG Xiaodi, et al. Method for selecting and filling capacity of electric vehicle charging piles[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 88-93.

[6] 黄巍, 吴俊勇, 鲁思棋, 等. 电压偏差和谐波约束下配网光伏最大渗透率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 49-55. HUANG Wei, WU Junyong, LU Siqi, et al. Evaluation of maximum photovoltaic permeability of distribution network under voltage deviation and harmonic constraints[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 49-55.

[7] 周娟, 任国影, 魏琛, 等. 电动汽车交流充电桩谐波分析及谐波抑制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 18-25. ZHOU Juan, REN Guoying, WEI Chen, et al. Harmonic analysis and harmonic suppression of electric vehicle AC charging pile[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 18-25.

[8] 戴喜良, 李尚盛, 孙建军, 等. 基于 DSP 与 FPGA 实现级联型谐波发生器的研究[J]. 电力电子技术, 2014, 48(4): 58-61. DAI Xiliang, LI Shangsheng, SUN Jianjun, et al. The research of cascaded harmonic generator based on DSP and FPGA[J]. Power Electronics, 2014, 48(4): 58-61.

[9] 赵波, 郭剑波, 周飞, 等. 新型多功能 10kV 电压扰动发生器的设计[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 75-80. ZHAO Bo, GUO Jianbo, ZHOU Fei, et al. Design of a novel multifunctional 10kV voltage disturbance generator[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 75-80.

[10] 戴喜良, 李尚盛, 孙建军, 等. 电能质量扰动发生器控制策略及其实现[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 131-137. DAI Xiliang, LI Shangsheng, SUN Jianjun, et al. Control strategy and implementation of power quality disturbance generator[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 131-137.

[11] 杨小品, 查晓明, 李尚盛, 等. 基于 RTDS 的 APF 硬件在环仿真系统[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(11): 65-69. YANG Xiaopin, ZHA Xiaoming, LI Shangsheng, et al. APF hardware-in-the-loop simulation system based on RTDS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(11): 65-69.

[12] 曾杰, 冷风, 陈晓科, 等. 现代电力系统大功率数模混合实时仿真实现[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 166-171, 178. ZENG Jie, LENG Feng, CHEN Xiaoke, et al. Realization of high power digital-analog hybrid real time simulation in modern power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 166-171, 178.

[13] WU X, LENTIJO S, DESHMUK A, et al. Design and implementation of a power-hardware-in-the-loop interface: a nonlinear load case study[C] // Applied Power Electronics Conference and Exposition, March 6-10, 2005, Austin, TX, USA: 1332-1338.

[14] 李国庆, 江守其, 辛业春, 等. 柔性高压直流输电系统数字物理混合仿真功率接口及其算法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1915-1924. LI Guoqing, JIANG Shouqi, XIN Yechun, et al. Digital-physical hybrid simulation power interface and its algorithm for flexible HVDC transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1915-1924.

[15] 辛业春, 江守其, 李国庆, 等. 电力系统数字物理混合仿真接口算法综述[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 159-167. XIN Yechun, JIANG Shouqi, LI Guoqing, et al. An overview of digital-physical hybrid simulation interface algorithms for power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 159-167.

[16] 莫染. 电力系统数字物理综合仿真接口方法[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013. MO Ran. Interface method for power system digital physics synthesis simulation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.

[17] 胡显宙, 张沛超, 方陈, 等. 功率连接型数字物理混合仿真系统 (一)接口算法特性[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7): 36-41. HU Yuzhou, ZHANG Peichao, FANG Chen, et al. Power connected digital-physical hybrid simulation system (1) interface algorithm characteristic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(7): 36-41.

[18] 洪峰, 刘苗, 嵇保健, 等. 一种飞跨电容型多电平逆变器电容建压方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(6): 17-23. HONG Feng, LIU Miao, JI Baojian, et al. A capacitive voltage building method for flying transcapacitor multilevel inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(6): 17-23.

[19] 余致廷, 曹达, 彭永进. 二极管箝位五电平变换器控制方法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(4): 47-49, 54. SHE Zhiting, CAO Da, PENG Yongjin. Control method of Diode clamped five level converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 47-49, 54.

[20] 杨晓峰, 郑琼林, 薛尧, 等. 模块化多电平换流器的拓扑和工业应用综述[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 1-10. YANG Xiaofeng, ZHENG Qionglin, XUE Yao, et al. The topology and industrial application of modular multilevel converter[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 1-10.

收稿日期: 2018-03-31; 修回日期: 2018-08-25

作者简介:

王金浩(1975—), 男, 硕士, 教授级高工, 从事电力系统电能质量分析与控制、新能源发电及智能电网技术研究工作;

钟佩军(1996—), 男, 在读硕士, 从事电力系统电能质量、电力电子控制等相关研究工作. E-mail: 1149640424@qq.com

(编辑 姜新丽)