

新能源系统物理模拟实验平台设计及应用

徐岩, 王扬

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 河北保定 071003)

摘要: 从物理模拟实验的角度对新能源电力系统进行研究。首先,总结了国内外新能源电力系统的发展现状。然后阐述了通过物理模拟实验探究新能源电力系统的必要性,以及新能源物理模拟实验的研究现状。随后设计、介绍了新能源物理模拟实验平台的主要构成。最后,应用实验平台,重点针对并网运行的暂稳态特性,设计了实验方案,分析了实验结果,表明物理实验平台对研究新能源电力系统具有重要意义。

关键词: 新能源; 电力系统; 物理模拟; 实验平台; 并网运行

Physical simulation experimental platform design and application of renewable energy electric power system

XU Yan, WANG Yang

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: A study is made on the renewable energy power system in terms of physical simulation experiments. Firstly, it summarizes the development status of renewable energy power system at home and abroad. Secondly, it elaborates the necessity of researching renewable energy power system through physical simulation experiments and the research status of physical simulation experiments. Then, it conceives and introduces the major components of experimental platform. Lastly, it formulates the experiment plans by applying experimental platform and focusing on dynamic/static state characteristics of grid-connected operation, and analyzes the results which show that physical experimental platform is significant for the study of renewable energy power system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277072) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 12MS110).

Key words: renewable energy sources; power system; physical simulation; experimental platform; grid-connected operation

中图分类号: TM74 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)08-0127-07

0 引言

近年来,可再生能源已成为实现能源多样化、社会可持续发展的重要替代能源。新能源中,太阳能、风能是应用最广泛的自然资源,且都具有较广阔的应用前景^[1-3]。

世界各国正围绕可再生能源,结合自身科技优势开展研究。美国致力于推动微电网和太阳能产业的核心技术研发;欧盟以分布式电源和可再生能源的大规模利用为主要目标;日本着力建设与大规模太阳能发电相适应的电网。中国截止2011年底,风电并网装机容量达到4505万kW,规模化开发格局初

步形成;太阳能发电并网装机容量达到214万kWh,太阳能发电由起步阶段走向规模化发展阶段^[4]。

目前针对新能源(特别是大规模新能源利用)的研究,多局限于理论研究和数字仿真^[5-7],少有通过物理模拟的手段对新能源电力系统进行实验分析。数字仿真虽然使用灵活、计算简单,但是难以准确模拟系统的暂态过程;而根据相似理论建立的物理模拟系统,能够真实地展现系统原貌,反映系统的暂态特性,便于解决难以建立数学模型的复杂问题。本文依托华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室,设计新能源电力系统物理模拟实验平台及实验方案,研究新能源协调运行和跨区消纳,为深入分析大规模新能源的接入提供强有力的技术支撑。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277072);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(12MS110)

1 新能源电力系统物理模拟实验

1.1 实验意义

作为电力系统模拟研究领域成熟和重要的技术手段，物理模拟实验实证性强、技术成熟、仿真结果准确可靠。在系统运行特性研究、事故分析等研究方面起着重要作用。由文献[8]可知，物理模拟具有以下应用特点，对分析研究新能源系统具有重要的意义：

(1) 物理模拟可有效地研究内在过程不清楚、难以或不能用数学方法描述的现象，直接、可靠地检验理论分析和计算结果。因此，能很好地解决新能源电力系统随机性强、潮流多变、难以建立准确的数学模型进行模拟的问题。

(2) 物理模拟可通过模型直接观察物理过程，物理概念明确，可方便地对电力系统的特性和过程进行定性和定量的研究。针对新能源并网瞬间时间短、内在相互作用复杂，物理模拟能够更加真实地展现系统原貌、反映系统的暂态特性。

(3) 物理模拟可直接研究、测试和检验新的各种自动调节和自动控制装置。系统结构灵活，具有更强的适应性。同时，与在实际系统中实验相比，减少了实验资金、设备的投入。

1.2 实验现状

目前通过物理模拟实验的方式，对大规模新能源进行系统研究的文献较少，且现有物理实验多受条件限制。文献[9]模拟风光互补发电系统，但发电过程中新能源比重小，难以模拟大规模新能源接入对区域电网的影响。文献[10]介绍了小型风光互补系统的组成、并网与监控，但未涉及风光间的协调控制。文献[11]模拟了混合发电系统并网与独立运行的过程切换，但系统的波动性并未充分考虑。文献[12-13]依托国家风光储示范工程，分别对风光储联合发电的容量配比、无功补偿配置、调度运行原则和协调运行进行了研究，但设备成本高，实验室难以实现。

当前新能源电力系统的物理模拟实验存在以下问题：1) 实验机组容量小，难以准确模拟机组对电网运行特性的影响；2) 模型结构过于简化，难以展现具体动态过程；3) 研究对象单一，缺乏对新能源“多源”系统协调控制模拟。由此，设计“风、光、储、输”一体的新能源电力系统物理模拟实验平台，对研究大规模可再生能源接入电网等技术问题具有重要意义。

2 新能源系统物理模拟实验平台构成

新能源电力系统物理模拟实验平台采用模块化设计，通过切换盘对系统进行组态，可形成不同类型的实验系统，满足不同研究的需要。图 1 和图 2 分别为物理模拟实验平台构成示意图和主体实物图，如图 1 所示，实验平台构成主要包括风力发电模拟系统、光伏发电系统、储能系统、输电网物理模型、新能源发电等值系统等 12 个模块。

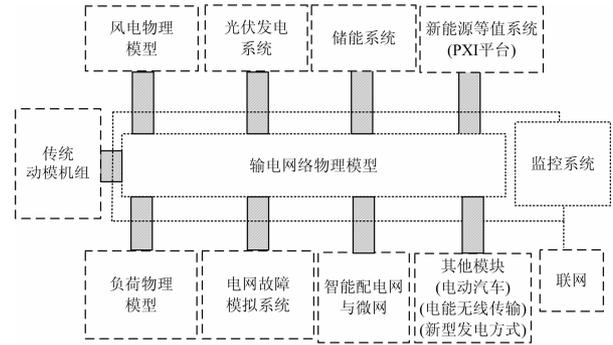


图 1 物理模拟系统构成示意图
Fig. 1 Schematic of physical simulation system

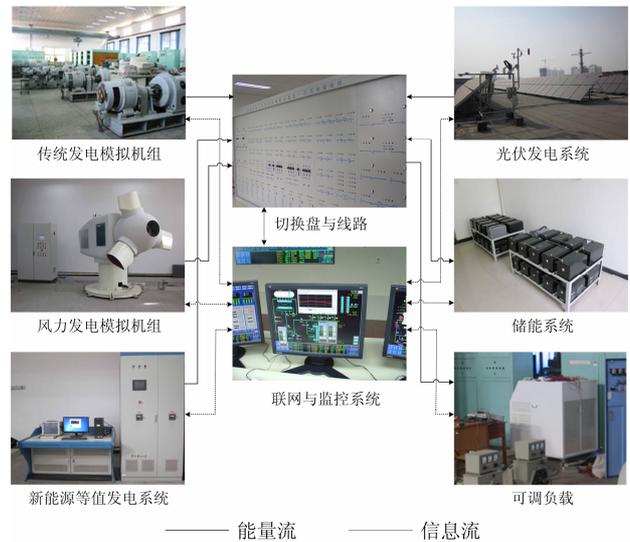


图 2 实验平台实物图
Fig. 2 Physical map of experimental platform

2.1 传统动态模拟系统

传统动模发电系统由不同容量机组构成，包括 5 kVA、5.5 kVA、6.25 kVA、15 kVA、30 kVA 机组，如图 3 所示，通过控制器模拟汽轮机、水轮机、柴油机等机组发电特性。传统动模机组除可独立并网运行模拟各种典型发电机及其并网控制系统特性外，还可实现发电机转子、定子匝间短路，进行发电机保护、故障诊断等方面的研究。

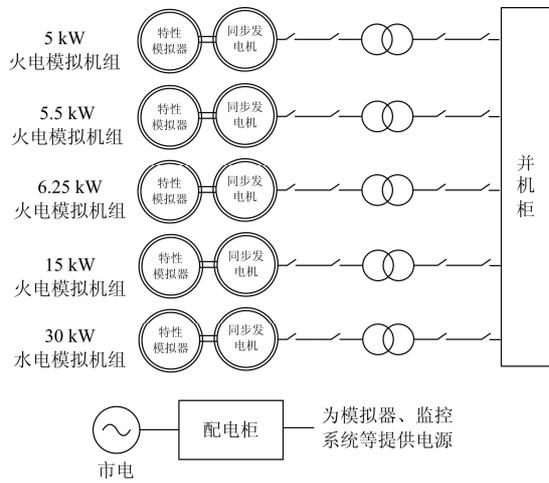


图3 传统动模系统构成示意图

Fig. 3 Structure of traditional physical simulation system

2.2 风力发电模拟系统

风力发电模拟系统由4套10 kW风电机组实验系统构成, 包括全功率驱动异步风力发电机组、双馈风力发电机组、永磁同步风力发电机组和大型风力发电机组缩比模型, 如图4所示。模拟系统在机械特性、电气参数和并网控制技术等方面和大型风力发电机组保持了较高相似性。风电机组除可独立并网运行模拟各种典型风力发电机及其并网控制系统特性, 还可组合后以风电场/群形式并网, 从而可进行多风电机组或多风电场的调峰、调压、调频等协调控制策略研究。

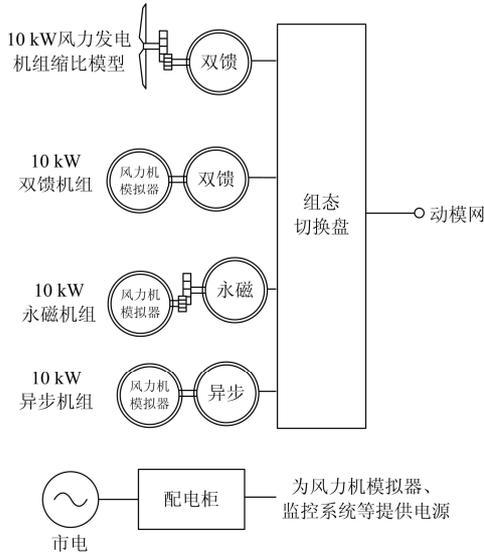


图4 风力发电模拟系统构成示意图

Fig. 4 Structure of wind power generation simulation system

图5是以大型风力发电机组缩比模型为例的实际运行功率曲线, 系统启动后进行发电实验, 初始

风速为3 m/s, 然后提高至5 m/s, 最后至8 m/s。如图5所示, 风速5 m/s时发电机有功功率为2.3 kW, 风速8 m/s时有功功率阶跃至6.71 kW。

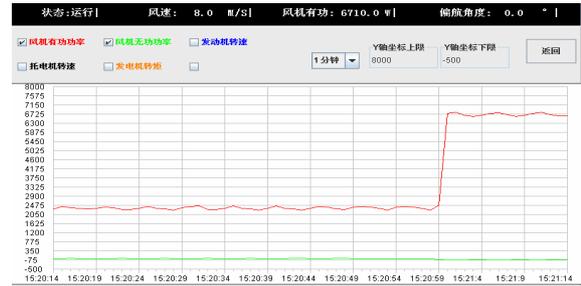


图5 大型风力发电机组缩比模型功率曲线

Fig. 5 Power curves of large-scale wind turbine model

2.3 光伏发电系统

光伏发电系统由4套光伏子系统组成, 分别是5 kW单晶硅光伏发电系统、5 kW单晶硅寻日光伏发电系统、10 kW多晶硅光伏发电系统和10 kW薄膜光伏发电系统, 如图6所示。其中包括一组寻日光伏发电系统, 以模拟不同的阳光照射角度对光伏发电系统的影响。发电系统既能够离网运行, 又能够接入电网、微网运行, 且考虑了发生孤岛运行时的反孤岛策略。

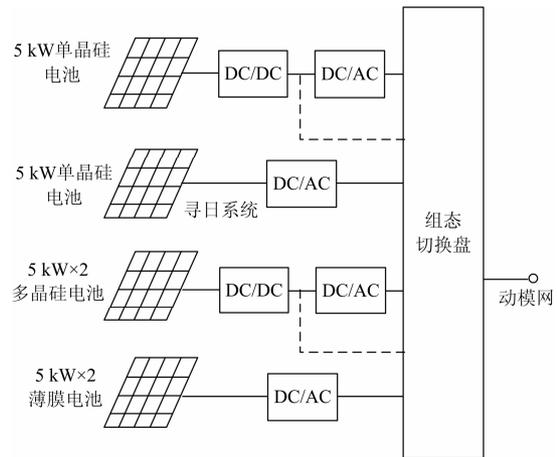


图6 光伏发电及储能系统构成示意图

Fig. 6 Structure of PV generation and energy storage system

图7是以多晶硅光伏发电系统为例的实际运行有功曲线。取2012年4月27日的发电功率数据进行分析, 如图7所示: 7:56分系统启动, 随着光照辐射的增强功率逐渐上升, 12:49达到最大值7.15 kW, 随着光照辐射的减弱功率逐渐下降, 在15:51至17:20之间光照多次被云遮挡从而出现明显的功率波动现象, 18:00系统停止运行。

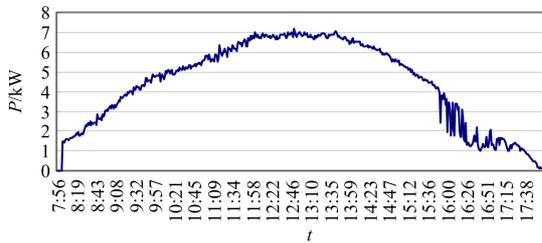


图 7 多晶硅光伏发电系统有功曲线

Fig. 7 Active power curve of the polysilicon photovoltaic power generation system

2.4 储能系统

储能系统由储能部件、辅助能源控制柜、监控终端构成，其中电池储能元件包括：铅酸电池、钠盐电池、液流电池、锂离子电池四种蓄电池。储能系统可配合风力、光伏发电系统实现并网与离网相互转换的平滑过渡；改善电能质量，平缓单个负荷的投入和退出引起的电压、频率波动；研究不同的储能元件运行特性，以及多类型储能系统的协调控制技术。

图 8 是以铅酸蓄电池为例的实际运行效果，系统初始状态为充电状态，功率为-0.45 kW，在 6 个时刻分别设置放电功率为 1 kW、2 kW、3 kW、4 kW、1 kW 和 0 kW，从功率曲线可以看出放电功率能跟踪参考值。

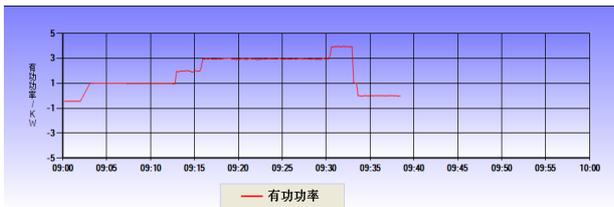


图 8 蓄电池放电有功功率曲线

Fig. 8 Active power curve of battery discharge

3 平台实验设计与功能应用

新能源电力系统物理模拟实验平台可以根据输配电网的需要自由改变结构，硬件上达到了“即插即用”，可以为新能源系统的研究提供支持。

新能源的并网和消纳是限制其发展的关键技术问题。系统调节能力、并网运行技术、电网输电能力、调度运行水平等因素决定了在现有客观条件下，能否实现新能源发电的最大化消纳^[14]。针对新能源消纳应用本实验平台，设计实验方案如下。

3.1 并网运行与稳态暂态特性

实验平台通过切换接入电网的机组，可模拟传统电源（火水）与新能源（风光储）消纳运行、新能源（风光储）间的互补^[15-16]运行；通过平稳改变

发电侧功率输出、负载侧功率，研究系统稳态特性；通过并网、瞬时改变负载容量、故障模拟等，研究新能源电力系统的暂态特性。实验平台可逐层深入地研究新能源电力系统运行特性以及互补方案，探究合理的多源互补发电比例。

3.1.1 实验方案

本文以 IEEE 3 机 9 节点典型电网模型为例，模拟火、水、光电机组连网运行，如图 9 所示，设计实验如下：

- a、实验接线图如图 9 所示，正确设置断路器，依次使火、水电机组连网运行；
- b、调节电压、频率满足同期条件，将光伏发电系统并网，记录主要节点的电压 U 、频率 f ；
- c、瞬时减少光伏电池组出力，记录主要节点电压 U 、频率 f 、各机组出力的变化过程；
- d、启动负载侧电动机，记录主要节点电压 U 、频率 f 、各机组出力的变化过程；
- e、分析变化前后机组运行状态，研究系统稳态特性；分析变化瞬间机组运行状态，研究系统暂态特性。

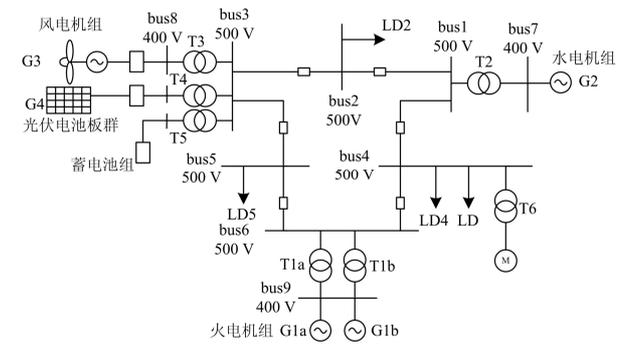


图 9 暂态/稳态特性实验接线图

Fig. 9 Experimental wiring diagram of dynamic/static state characteristics

3.1.2 实验结果与分析

实验主要观测量包括：水电机高压侧母线 1 电压 U_{bus1} 、电流 I_{G2} ，火电机低压侧母线 9 电压 U_{bus9} 、电流 I_{G1a} 、 I_{G1b} ，光伏电池组低压侧母线 3 电压 U_{bus8} 、电流 I_{G4} 。

光伏出力改变的实验结果如图 10 和表 1 所示。图 10 为光伏减少各机组出力变化过程，在 $t=0$ 至 0.75 s 时，系统处于稳态，各机组电压电流保持恒定； $t=0.75$ s 时，光伏系统出力突然减少 6 kW，电流减少 46.9%，系统启动自动调节，火水电机组电流振荡增加； $t=1.4$ s 时，系统重新恢复稳态，由表 1 可知与扰动前相比，电压基本保持稳定，火水电机组电流增加 68.9%、105.9%、87.1%。可见，系统

具有较强的消纳能力,当新能源出现较大波动时,火水发电机组能够快速调节,维持系统稳定。

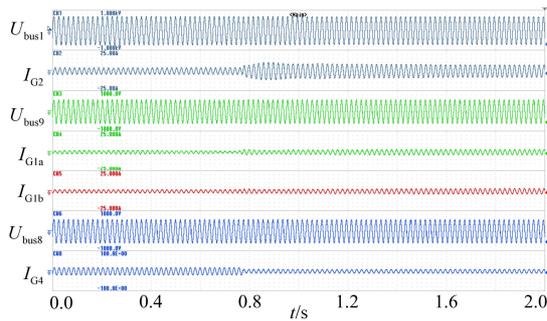


图 10 光伏减少时各机组的电压电流波形

Fig. 10 Voltage and current waveforms of units when the PV reduces

表 1 光伏减少前后系统电压电流稳态值

Table 1 Steady-state value of voltage and current before and after PV reduction

状态	$U_{bus1}/$ V	$I_{G2}/$ A	$U_{bus9}/$ V	$I_{G1a}/$ A	$I_{G1b}/$ A	$U_{bus8}/$ V	$I_{G4}/$ A
扰动前	498.7	3.22	410.5	1.19	1.40	412.5	13.5
扰动后	496.4	5.44	400.2	2.45	2.62	414.0	7.17

电动机负载启动时的实验结果如图 11 和表 2 所示。图 11 为电动机启动各机组出力变化过程,在 $t=0$ 至 0.8 s 时,系统处于稳态,各机组电压电流保持恒定; $t=0.8$ s 时,负载侧 1 台 3 kW 电动机启动产生扰动,系统启动自动调节,火水发电机组电流振荡增加; $t=1.5$ s 时,系统重新恢复稳态,由表 2 可知与扰动前相比,电压基本保持稳定,水水发电机组电流增加 169.6%、54.1%、70.8%,光伏系统保持最大功率跟踪,电流基本稳定。可见,系统具有较强的调节能力,当负载侧出现较大波动时,系统能够快速调节,维持系统稳定。

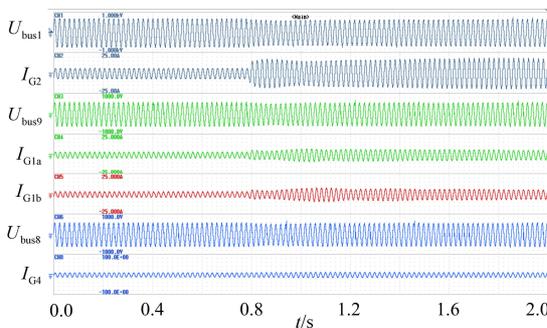


图 11 电动机启动时各机组的电压电流波形

Fig. 11 Voltage and current waveforms of units when the motor starts

表 2 电动机启动前后系统电压电流稳态值

Table 2 Steady-state value of voltage and current before and after the motor starts

状态	$U_{bus1}/$ V	$I_{G2}/$ A	$U_{bus9}/$ V	$I_{G1a}/$ A	$I_{G1b}/$ A	$U_{bus8}/$ V	$I_{G4}/$ A
扰动前	501.5	4.60	408.5	2.79	2.64	414.8	8.06
扰动后	473.3	12.4	426.6	4.30	4.51	420.7	8.30

此外,可在电网不同位置设置不同类型的故障,研究新能源机组接入对电网短路容量、故障时动态特性以及故障解除后机组恢复能力的影响。

3.2 电网传输对跨区域消纳的影响

电网传输能力是限制新能源跨区域消纳的重要因素之一。利用实验平台,通过搭建输电网络,可模拟不同电网结构、输电方式,研究电网传输对跨区域消纳的影响^[17],分析联络线输送容量、联络线调整周期、联络线输送方式等具体因素对新能源消纳的影响,探究合理的跨区域消纳策略。

本文设计实验研究跨区域新能源电源消纳,接线如图 12 所示,电网模型采用两个 IEEE 3 机 9 节点的典型电网模拟两区域。设计 5 种实验场景如表 3 所示。记录 5 种场景下电网的运行状况,并进行对比,分析实验数据。

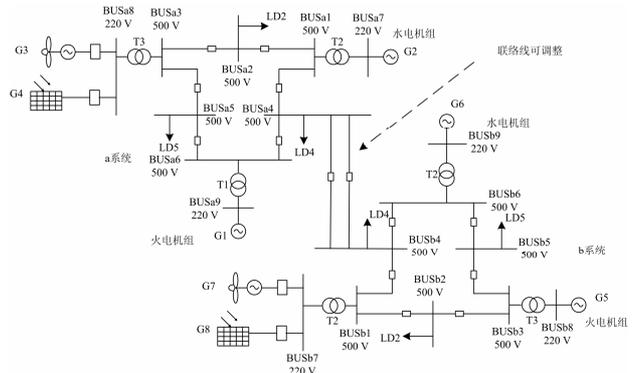


图 12 跨区域消纳实验接线图

Fig. 12 Experiments wiring diagram of cross-region accommodating

表 3 实验系统运行场景

Table 3 Experimental operating situations of system

场景	运行模式	传输容量	联络线调整周期	传输方式
1	独立运行	-	-	-
2	联网运行	I	T	交流
3	联网运行	$0.5I$	T	交流
4	联网运行	I	$0.5T$	交流
5	联网运行	I	T	直流

4 结论

本文分析了通过物理模拟实验研究新能源电力系统的必要性,在总结国内外新能源物理模拟实验发展现状的基础上,围绕实验平台设计和应用两个层面,详细阐述了新能源电力系统物理模拟实验平台的构成和实验方案,分析了实验结果。表明物理实验平台对研究新能源电力系统具有重要意义。

此外,实验平台可以根据电网需要自由改变结构,硬件上可以实现“即插即用”。因此,实验不局限于文中提出的方案,应用新能源实验平台可以满足不同电网结构的需要,为新能源研究提供保障。

参考文献

- [1] 宋洪磊, 吴俊勇, 冀鲁豫, 等. 风光互补独立供电系统的多目标优化设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 104-111.
SONG Hong-lei, WU Jun-yong, JI Lu-yu, et al. Multi-objective optimal sizing of stand-alone hybrid wind/PV system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 104-111.
- [2] 刘立群, 王志新, 顾临峰, 等. 基于改进模糊法的分布式风光互补发电系统 MPPT 控制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 70-74, 79.
LIU Li-qun, WANG Zhi-xin, GU Lin-feng, et al. MPPT control based on improved fuzzy method for distributed hybrid wind-solar power generating systems[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 70-74, 79.
- [3] 郭天勇, 赵庚申, 赵耀, 等. 基于风光互补的微网系统建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 104-108.
GUO Tian-yong, ZHAO Geng-shen, ZHAO Yao, et al. Modeling and simulation of microgrid system based on wind-solar hybrid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 104-108.
- [4] 刘振亚. 中国电力与能源[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
LIU Zhen-ya. Electric power energy in China[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.
- [5] 胡胜, 林新春, 康勇, 等. 一种双馈风力发电机在电网电压不平衡条件下的改进控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 21-29.
HU Sheng, LIN Xin-chun, KANG Yong, et al. An improved control strategy of doubly-fed induction generator under grid voltage unbalance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 21-29.
- [6] 冯希科, 邵能灵, 宋凯. 风力发电机对配电网影响的比较分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(21): 25-30.
FENG Xi-ke, TAI Neng-ling, SONG Kai. Comparative analysis on the impact of the wind generator connected to the distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(21): 25-30.
- [7] 孙自勇, 宇航, 严干贵, 等. 基于 PSCAD 的光伏阵列和 MPPT 控制器的仿真模型[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 61-64.
SUN Zi-yong, YU Hang, YAN Gan-gui, et al. PSCAD simulation models for photovoltaic array and MPPT[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 61-64.
- [8] 金启玫, 杨卫国. 电力系统物理模拟综述[J]. 电工技术杂志, 1999(1): 9-11.
JIN Qi-mei, YANG Wei-guo. Overview of the physical simulation of power system[J]. Electrotechnical Journal, 1999(1): 9-11.
- [9] 黄来, 李劲柏, 刘武林. 风光互补新能源并网发电试验系统的研制与应用[J]. 湖南电力, 2011, 31(4): 10-13.
HUANG Lai, LI Jing-bo, LIU Wu-lin. Development and application on grid-connected test system of the wind-solar complementary new energy[J]. Hunan Electric Power, 2011, 31(4): 10-13.
- [10] 赵邈, 陆佳政, 周任军, 等. 小型风光互补并网发电系统[J]. 湖南电力, 2011, 31(1): 10-13.
ZHAO Miao, LU Jia-zheng, ZHOU Ren-jun, et al. The small-scale wind-solar hybrid grid-connected generation system[J]. Hunan Electric Power, 2011, 31(1): 10-13.
- [11] DALI M, BELHADJ J, ROBOAM X. Hybrid solar-wind system with battery storage operating in grid-connected and standalone mode: control and energy management-experimental investigation[J]. Energy, 2010, 35: 2587-2595.
- [12] 唐宏德, 郭家宝, 陈文升. 风光储联合发电技术及其工程应用[J]. 电力与能源, 2011(1): 61-63.
TANG Hong-de, GUO Jia-bao, CHEN Wen-sheng. The joint technology of wind power-photovoltaic power-energy storage and its engineering application[J]. Power and Energy, 2011(1): 61-63.
- [13] 於益军, 雷为民, 单茂华, 等. 风光储联合发电监控系统功能设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(20):

- 32-38.
YU Yi-jun, LEI Wei-min, SHAN Mao-hua, et al. Design and application of supervision and control system for wind-photovoltaic-battery power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(20): 32-38.
- [14] 杨秀媛, 刘小河, 张芳, 等. 大型太阳能并网发电模型及应用[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(增刊 1): 19-22.
YANG Xiu-yuan, LIU Xiao-he, ZHANG Fang, et al. Model of large PV and its applications on power system analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(S1): 19-22.
- [15] 计长安, 张秀彬, 赵兴勇, 等. 基于模糊控制的风光互补能源系统[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 178-184.
JI Chang-an, ZHANG Xiu-bin, ZHAO Xing-yong, et al. Complementary wind-solar power system based on fuzzy control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10): 178-184.
- [16] 蔡国伟, 孔令国, 杨德友, 等. 大规模风光互补发电系统建模与运行特性研究[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 65-71.
CAI Guo-wei, KONG Ling-guo, YANG De-you, et al. Research on modelling and operation characteristics analysis of large-scale wind and light complementary electricity-generating system[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 65-71.
- [17] 韩小琪, 孙寿广, 戚庆茹. 从系统调峰角度评估电网接纳风电能力[J]. 中国电力, 2010, 43(6): 16-19.
HAN Xiao-qi, SUN Shou-guang, QI Qing-ru. Evaluation of wind power penetration limit from peak regulation[J]. Electric Power, 2010, 43(6): 16-19.

收稿日期: 2013-07-09; 修回日期: 2013-10-31

作者简介:

徐 岩 (1976-), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统保护与安全控制和新能源发电与智能电网;

王 扬 (1989-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为新能源电力系统。E-mail: hbswy@126.com