

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.10.024

孤岛微网中风光储混合建模及仿真研究

邓 皓^{1,2}, 崔双喜¹, 孙彦萍², 樊小朝¹, 侯俊杰¹, 梁培岳³

(1. 新疆大学电气工程学院, 乌鲁木齐 830047; 2. 国网浙江省电力有限公司检修分公司, 杭州 310000; 3. 华能新疆三塘湖风力发电有限责任公司, 新疆 哈密 839205)

摘要: 针对目前微网系统孤岛运行很难获得最大功率和稳定电压的问题, 建立了一种可有效抑制功率和电压波动的风光储微网发电系统模型。光伏和风电环节均采用基于扰动观察法的最大功率跟踪控制策略, 保证系统获得最大功率及电压; 储能环节采取结合 U/f 控制和功率、电流双环控制的控制策略, 维持系统功率及电压的稳定。结合新疆哈密地区实际光照强度、温度及风速的变化, 基于 MATLAB/Simulink 平台对该微网系统进行了仿真。仿真结果验证了所提模型的可靠性和控制策略的有效性。

关键词: 风光储微网; 孤岛; 控制策略; 建模; 仿真

Study on Modeling and Simulation of the Wind/PV/Storage Hybrid in Islanding Micro-grid System

DENG Hao^{1,2}, CUI Shuangxi¹, SUN Yanping², FAN Xiaochao¹, HOU Junjie¹, LIANG Peiyue³

(1. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. Maintenance Branch of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 3. Huaneng Xinjiang Santanghu Wind Power Generation Co., Ltd., Xinjiang Hami 839205, China)

Abstract: According to the problem that the micro-grid islanding operation is very difficult to obtain the maximum power and the stability voltage, a model of the wind/PV/storage micro-grid generation system is established to suppress the fluctuation of power and voltage. Both the PV array and the wind power system take the MPPT control strategy based on the disturbance observation method to ensure the maximum power and voltage of the system; The energy storage system adopts the control strategy combining U/f control and power and current double loop control to maintain the power and voltage stability of the system. Considering the changes of the actual illumination intensity, temperature and wind speed in Xinjiang, Hami, the micro-grid system is simulated based on the MATLAB/Simulink platform. The simulation results verify the reliability and effectiveness of the proposed micro-grid model.

Key words: wind/PV/storage micro-grid; islanding; control strategy; modeling; simulation

0 引言

如今,不同的可再生能源被利用来发电。事实上,分布式电源(DG)的使用可以减少人们对传统能源的需求,并减少污染^[1-3]。风能和太阳能固有的特性使风/光耦合发电可以提高能源使用效率^[4-5]。但是

可再生能源固有的随机性和间歇性容易造成其出力不稳定,为此需要配置储能系统来稳定其出力^[6-9]。因此,建立光伏、风电、以及储能相结合的混合发电系统受到人们的高度重视。

混合微网发电系统是两个或两个以上可再生能源及储能的组合。它在效率、成本、机动性和可

收稿日期:2019-02-19; 修回日期:2019-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51666017); 新疆大学自然科学基金项目(BS160246); 2017年自治区研究生科研创新项目(XJGRI2017017)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China(51666017), the Natural Science Foundation of Xinjiang University(BS160246), Research Projects for Xinjiang Uygur Autonomous Region Graduate Students in 2017(XJGRI2017017).

靠性方面比单一可再生能源更有效^[10-14]。目前,国内对于风光储混合微网发电系统的研究还属于初级阶段,建立可靠、准确的微网模型有助于推进微网的研究,为后续微网应用到实际工程项目中提供依据^[15-19]。文[20]搭建了风光储微网整体模型,并采用P/Q-U/f控制策略实现了微网在并网离网两种模式下的无缝切换,但并未给出单个微源具体模型;文[21]搭建了整体微网实验模型,重点研究了微网的运行特性,但未给出具体的控制方法;文[22]利用MATLAB软件搭建了混合微网,进行了详细的仿真分析,但是并没有考虑到储能环节的充放电过程。

针对新疆地理位置优越,日照时间长,有着丰富的太阳能资源和风能资源的特点,根据新疆哈密的光照强度、温度以及风速情况,对风光储混合发电系统进行建模。文中采用的光伏阵列是一个1.5 kW的子系统,风力发电机选择双馈感应发电机,均采用基于扰动观察法的最大功率跟踪(MPPT)控制,储能环节采用成本低且充放电特性稳定的蓄电池。同时考虑风光间歇性和随机性的特点对风光互补发电系统和风光储混合发电系统进行仿真,最后给出结论。

1 混合微网发电系统建模

1.1 光伏发电系统建模

首先,搭建光伏电池等效电路,见图1。

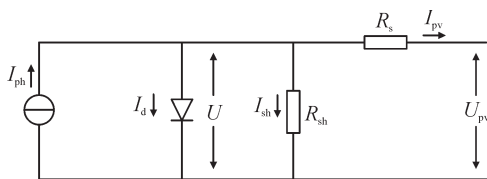


图1 太阳能电池等效电路

Fig. 1 Solar cell equivalent circuit

图1中: I_{ph} 、 I_d 、 I_{sh} 分别表示光伏电池的电流源、该二极管的电流和与其并联的固有并联电流; R_s (0.000 1 Ω)和 R_{sh} (1 000 Ω)分别是光伏电池的串联电阻和固有并联电阻。

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T_a - T_r)] \times I_{rr} / 1\,000 \quad (1)$$

$$I_{sh} = \frac{U + I_{pv} \cdot R_s \cdot \frac{N_s}{N_p}}{R_{sh}} \quad (2)$$

$$I_d = I_0 \left[\exp \left(\frac{U + I_{ph} \cdot R_s \cdot \frac{N_s}{N_p}}{N_s \cdot n \cdot U_t} \right) - 1 \right] \quad (3)$$

式(1)-(3)中: N_s 和 N_p 分别为并联和串联的单元数; n 是单元的理想因子; U_t 是二极管的热电压,见

式(4)。

$$U_t = \frac{k \times T}{q} \quad (4)$$

式(4)中: k 是玻尔兹曼常数($k=1.380\,6 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$), q 是电子电荷($q=1.602\,2 \times 10^{-19} \text{ C}$)。

I_0 是饱和电流,随着电池温度变化。

$$I_0 = I_{rs} \left[\frac{T_a}{T_r} \right]^3 \times \exp \left[\frac{q \times E_g}{nk} \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_r} \right) \right] \quad (5)$$

式(5)中, I_{rs} 是模块反向饱和电流,由式(6)计算得出。

$$I_{rs} = I_{sc} / \left\{ \exp \left[q U_{oc} / (N_s k n T_a) \right] - 1 \right\} \quad (6)$$

式(7)、(8)给出了光伏电池的电压、电流方程,即

$$U_{pv} = I_{sh} R_{sh} - I_{pv} \left(R_s \frac{N_s}{N_p} \right) \quad (7)$$

$$I_{pv} = N_p \times I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (8)$$

为了得到光伏阵列模型的最大功率输出,文中采用变步长扰动观察法来进行追踪,实时步长为

$$a_{(k+1)} = \varepsilon \frac{|\Delta P|}{a_{(k)}} \quad (9)$$

式(9)中: $a_{(k+1)}$ 代表的调节步长; ε 是比例因子; ΔP 表示功率的变化。

具体流程见图2。

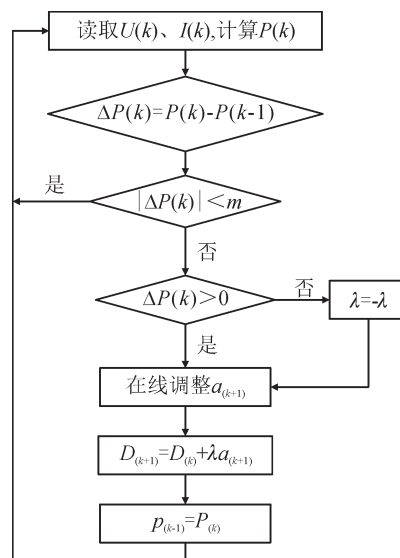


图2 扰动观察流程

Fig. 2 Flow chart of disturbance observation

图2中: m 为功率设定值; λ 的值为1或-1。

整个基于扰动观察法的MPPT控制的光伏阵列控制系统结构见图3。

1.2 风力发电系统建模

双馈电机的调速系统采用定子电压定向矢量控制,将其数学模型从三相坐标系下转变到两相同步旋转坐标系下。具体给出以下方程。

变器部分工作流程为,系统电压设定值 U_{ref} 与频率设定值 f_{ref} 与测量值 U_{grid}^{meas} 、 f_{grid}^{meas} 经 U/f 控制获得有功功率参考值 P_{ref} 、无功功率参考值 Q_{ref} ,通过功率控制器与网侧的有功、无功测量值 P_{grid}^{meas} 、 Q_{grid}^{meas} 调节为内环电流控制提供参考值。

2 混合微网孤岛运行综合控制策略

微网孤岛运行时,DG(分布式电源)与负荷满足下式时系统可保持平衡,电压和功率在额定值附近轻微波动。

$$\sum_{i=1}^m \bar{S}_{Gi} + \sum_{j=1}^n \bar{S}_{Sj} + \bar{S}_L = 0 \quad (16)$$

在式(16)中: $\bar{S}$ 表示复功率, $\bar{S}=P+jQ$; $\bar{S}_{Gi}$ 为微网系统中每个分布式微源发出的功率, $\bar{S}_{Sj}$ 为储能模块吸收或发出的功率; $\bar{S}_L$ 为系统的总负荷容量。实际运行过程分为两种情况,具体流程见图7。

1)当DG发电有盈余时,判断蓄电池的SOC(荷电状态)。若蓄电池未到SOC规定上限,则对蓄电池充电直至充满。若蓄电池到SOC充电上限时停止充电,限制DG出力。

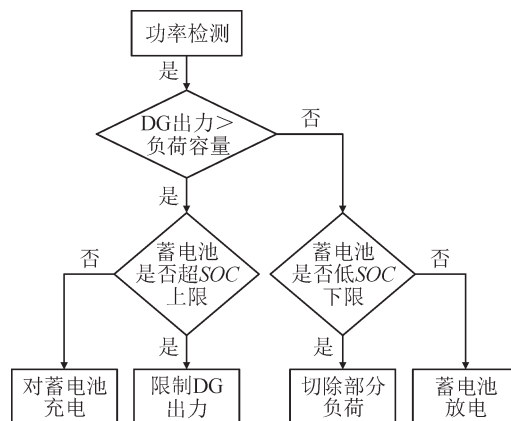


图7 微网系统控制流程

Fig. 7 Control flow chart of microgrid system

2)当DG发电相对于负荷的电量有缺额时,判断蓄电池的SOC。若蓄电池未到SOC规定下限则蓄电池放电供应负荷直至到达蓄电池的放电下限时停止放电,然后系统采取切除部分不重要负荷来维持平衡。

3 风光储微网系统仿真

在MATLAB/Simulink环境下搭建风光储混合微网发电系统的模型,见图8。

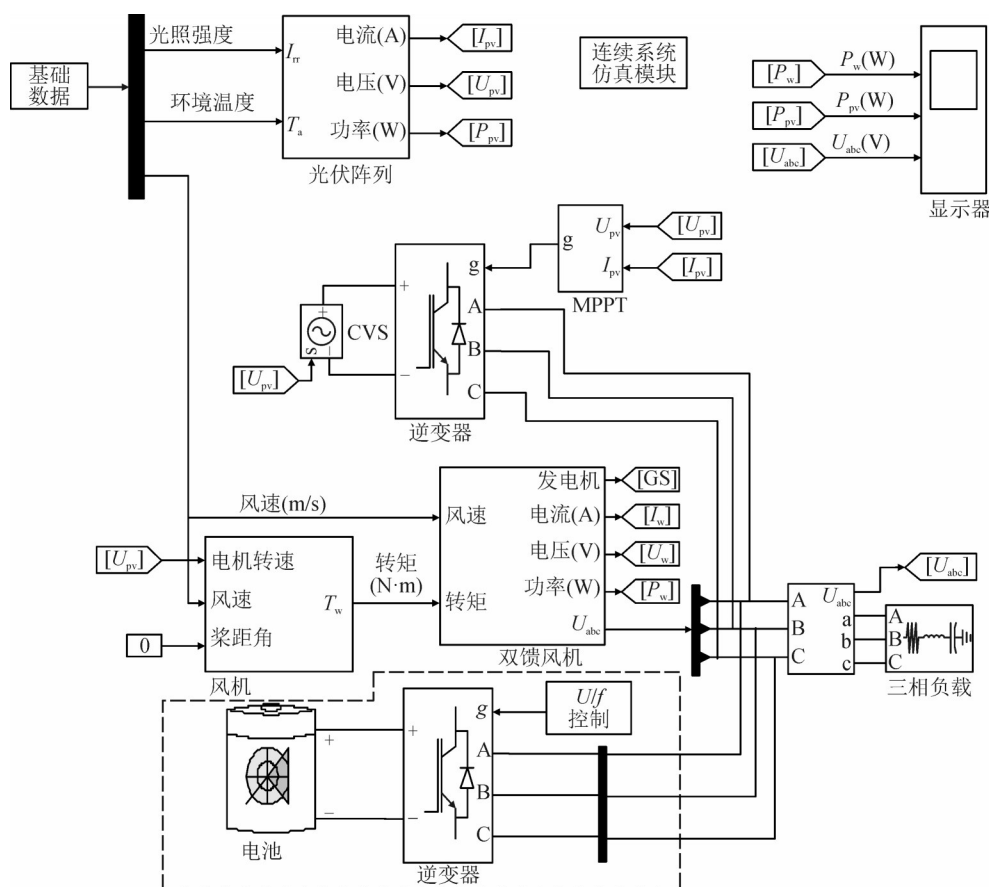


图8 微网发电系统的Simulink模型

Fig. 8 Simulink model of microgrid generation system

3.1 光伏阵列仿真

光伏阵列有两个输入参数:光照强度和环境温度。数据来源于新疆哈密春季某一天的光照强度和环境温度,太阳辐射和环境温度分别在0~806 W/m², 14~30 °C变化。

光伏模型的参数见表1。

表1 光伏阵列的参数

Table 1 Parameters of photovoltaic array	
系统参数	数值
开路电压 U_{oc}/V	21.6
25 °C、 $K_t=1\ 000$ 时,电池的短路电流/A	0.002
标称温度 T/K	298.15
二极管理想因子	1.2
半导体带隙能量(E_g)/eV	1.1

光伏阵列仿真曲线见图9。图9显示了光伏发电机经逆变器产生的交流电压和功率的变化情况。由图9可以看出,电压和功率的变化受太阳辐射和外界温度变化的影响,电压的波动范围为-500~500 V,功率的波动范围为0~5 kW。

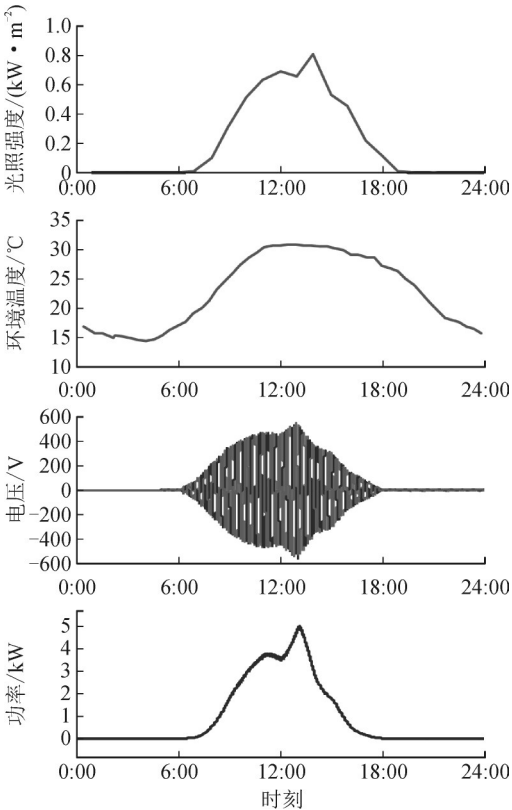


图9 光伏阵列仿真曲线

Fig. 9 Simulation curve of photovoltaic array

综上,光伏发电系统独立运行时,产生的电压及功率波动使其很难提供稳定的输出。

3.2 风电系统仿真

双馈风机的容量为1.6 kW;额定电压为400 V;

额定频率为50 Hz;其他参数见表2。

表2 风力发电机组的参数

Table 2 Parameters of wind turbines	
系统参数	数值
定子绕组电阻/ Ω	0.645
d,q 轴自感/H	0.052 97
极对数	3
转子磁链/rms	6.730 2
转动惯量	0.127 8

风机系统仿真曲线见图10。图10中给出了风速的行为,风速是风力机转换能量的最重要的数据。数据来源于新疆哈密春季某一天的风速变化情况,风速在2~8 m/s之间变化;图10中还显示了风力发电系统产生的电压和功率的变化情况。

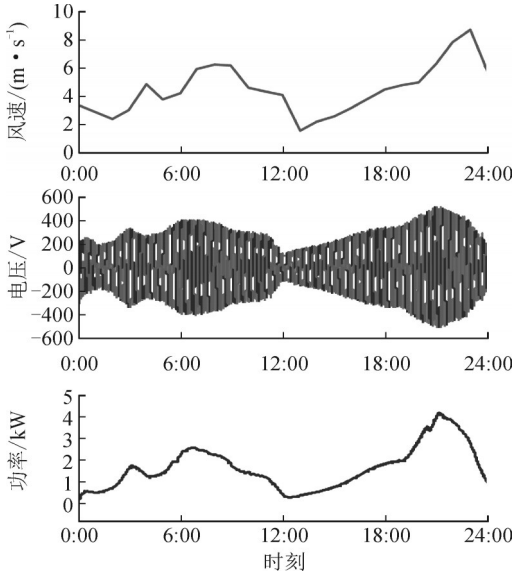


图10 风机系统仿真曲线

Fig. 10 Simulation curve of wind turbine generator system

由图10可以看出,输出电压和功率随风速的变化而变化,电压的波动范围为-500~500 V,功率的波动范围为0~4 kW。

综上,与光伏发电系统类似,独立运行的风电系统所产生的电压及功率的波动性也会影响系统的安全稳定运行。

3.3 风光互补系统仿真

结合文3.1、3.2节,可知独立的光伏或者风电系统很难提供稳定的功率及电压。将光伏阵列和双馈风机两个系统并联,并连接到三相交流负载进行仿真。风光互补系统仿真曲线见图11。

从图11可以看出,当PV电压介于0~500 V变化和风机系统介于100~500 V变化时,采用混合系统

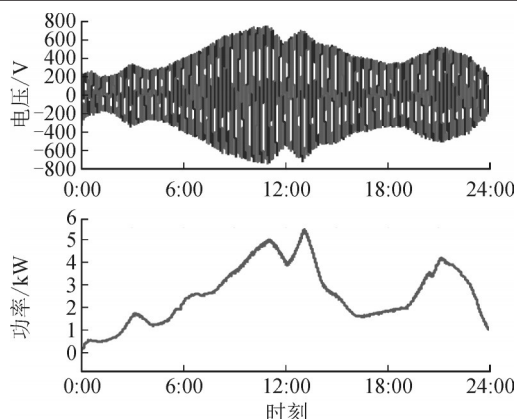


图11 风光互补系统仿真曲线

Fig. 11 Simulation curve of wind solar complementary system

产生的交流电压达到800 V。

从图11中混合系统产生的总功率曲线还可以看出,混合发电系统产生的功率几乎等于风机和光伏阵列产生的功率之和。

比较图9、10可知,风光互补系统总体电压及功率的波动比独立系统有所减小,但其瞬时电压及功率波动现象仍然存在。

3.4 风光储微网发电系统仿真

根据新疆哈密春季某天的光照强度、温度和风速情况,对文中搭建的风光储混合发电系统进行仿真。

公共点的额定电压、频率分别设为311 V、50 Hz、总负荷容量2 kW。仿真结果见图12。

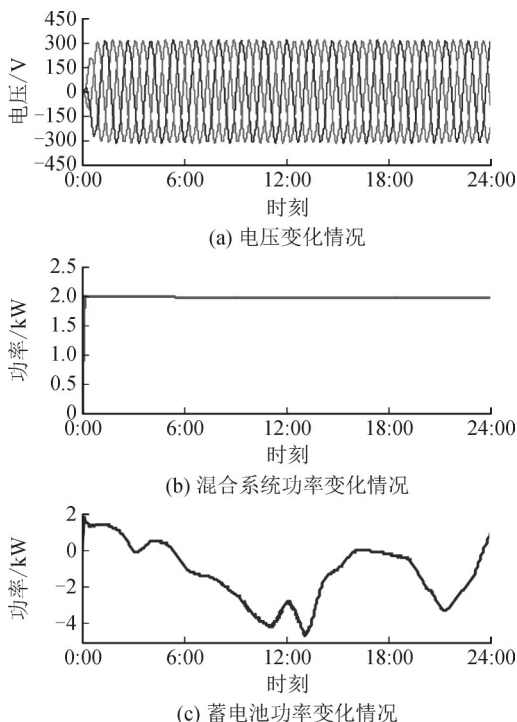


图12 风光储微网系统仿真曲线

Fig. 12 Simulation curve of microgrid system

由图12(a)可以看出,负荷电压稳定在310 V左

右;图12(b)是混合系统功率的变化情况;图12(c)代表的是蓄电池功率的变化情况,在-5.8~2.0 kW波动,可以看出,蓄电池通过充放电来使输出功率稳定在2 kW左右。

综上,风光储微网发电系统能够有效改善风光系统输出电压及功率波动的问题,使系统得以稳定运行。

4 结论

搭建了风光储微网发电系统模型,对其进行耦合,并对微网系统进行仿真,得出以下结论:

1)风光互补发电系统采取基于扰动观察法的最大功率跟踪控制策略能够有效的产生最大功率和电压。

2)蓄电池环节采取结合 U/f 控制和功率、电流双环控制的控制策略,稳定了系统的功率及电压。

3)所提模型对于新疆地区具有一定的参考性,有助于新疆地区可再生能源的发展和利用。

参考文献:

- [1] 黄宜平,马晓轩.微电网技术综述[J].电工技术学报,2015(s1):320-328.
HUANG Yiping, MA Xiaoxuan. Research on microgrid technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015(s1): 320-328.
- [2] 谢永涛,贾 嵘,董开松,等.交流微网整体建模及仿真研究[J].高压电器,2015,51(6):101-107.
XIE Yongtao, JIA Rong, DONG Kaisong, et al. Modeling and simulation of an AC microgrid[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 101-107.
- [3] 武 星,殷晓刚,宋 昕,等.中国微电网技术研究及其应用现状[J].高压电器,2013,49(9):142-149.
WU Xing, YIN Xiaogang, SONG Xin, et al. Research on microgrid and its application in China[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(9): 142-149.
- [4] 李 成,杨 秀,何海国,等.基于风光互补的独立微网系统容量优化[J].电源技术,2016,40(3):610-613.
LI Cheng, YANG Xiu, HE Haiguo, et al. Optimization allocation of standalone microgrid system capacity based on complementary characteristic of wind and solar[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(3): 610-613.
- [5] 马喜平,谢永涛,董开松,等.多能互补微电网的能量管理研究[J].高压电器,2015,51(6):108-114.
MA Xiping, XIE Yongtao, DONG Kaisong, et al. Research on energy management of multi-energy complementary microgrid[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 108-114.
- [6] 马 燕,徐立军.离网型风光互补系统控制策略探讨[J].

- 热能动力工程, 2016, 31(1): 1-12.
- MA Yan, XU Lijun. Exploratory investigation of the tactics for controlling an off-grid type wind-power-photovoltaic complementary system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2016, 31(1): 1-12.
- [7] 刘舒, 李正力, 王翼, 等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 78-84.
- LIU Shu, LI Zhengli, WANG Yi, et al. Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 78-84.
- [8] 张海燕, 秦亚斌, 肖春, 等. 独立风光储微电网中混合储能的管理控制策略[J]. 电气应用, 2017, 36(1): 18-25.
- ZHANG Haiyan, QIN Yabin, XIAO Chun, et al. Management and control strategy of hybrid energy storage in the independent wind/PV/storage microgrid[J]. Electrotechnical Application, 2017, 36(1): 18-25.
- [9] 吴振奎, 赵杰, 宋文隽. 含储能装置的低压微电网孤岛运行仿真[J]. 电源技术, 2015, 39(11): 2471-2473.
- WU Zhenkui, ZHAO Jie, SONG Wenjun. Islanding simulation of low voltage microgrid containing energy storage[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39(11): 2471-2473.
- [10] 侯世英, 毕晓辉, 孙韬, 等. 微电网孤岛状态下新型混合储能控制策略研究[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(5): 15-22.
- HOU Shiying, BI Xiaohui, SUN Tao, et al. Control strategy of hybrid energy storage under microgrid islanding operation state[J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(5): 15-22.
- [11] AMROLLAHI M H, BATHAEE S M T. Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind generation together with energy storage system in a stand-alone micro-grid subjected to demand response[J]. Applied Energy, 2017, 116(5): 66-77.
- [12] CEN Z, KUBIAK P, LÓPEZ C M, et al. Demonstration study of hybrid solar power generation/storage micro-grid system under qatar climate conditions[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2017, 53(6): 280-288.
- [13] 兰国军, 栗文义, 尹凯, 等. 基于混合储能的风光/储微电网控制策略[J]. 电源技术, 2015, 39(11): 2503-2506.
- LAN Guojun, LI Wenyi, YIN Kai, et al. Control strategy of wind/photovoltaic/storage micro-grid based on combined energy storage solutions[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39(11): 2503-2506.
- [14] 王建萍, 潘庭龙. 风光储微网系统孤岛运行控制策略研究[J]. 可再生能源, 2016, 34(12): 1804-1810.
- WANG Jianping, PAN Tinglong. Research on control strategy in islanded mode of wind-PV-ES hybrid microgrid system[J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(12): 1804-1810.
- [15] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.
- WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.
- [16] 蔡国伟, 孔令国, 潘超, 等. 风光储联合发电系统的建模及并网控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 196-204.
- CAI Guowei, KONG Lingguo, PAN Chao, et al. System modeling of wind-PV-ES hybrid power system and its control strategy for grid-connected[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 196-204.
- [17] ZHANG J Y, HUANG L, SHU J, et al. Energy management of PV-diesel-battery hybrid power system for island stand-alone micro-grid[J]. Energy Procedia, 2017, 622(3): 2201-2206.
- [18] 刘延博, 邱晓燕, 邱高, 等. 孤岛运行下含储能系统的微电网多代理博弈模型[J]. 高压电器, 2016, 52(7): 75-81.
- LIU Yanbo, QIU Xiaoyan, QIU Gao, et al. Multi-agent game model of micro-grid containing energy storage system in islanding operation[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(7): 75-81.
- [19] ABDULLAH A G, RISDIYANTO A, NANDIYANTO A B. Hybrid energy system design of micro hydro-PV-biogas based micro-grid[J]. Materials Science and Engineering, 2017, 180(1): 2080.
- [20] 赵杰, 王硕, 沈大力, 等. 基于多种分布式电源的微电网控制策略与仿真[J]. 中国电力, 2013, 46(7): 105-110.
- ZHAO Jie, WANG Shuo, SHEN Dali, et al. Control and simulation of a microgrid with different types of distributed generators[J]. Electric Power, 2013, 46(7): 105-110.
- [21] 刘一欣, 郭力, 李霞林, 等. 基于实时数字仿真的微电网数模混合仿真实验平台[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 82-92.
- LIU Yixin, GUO Li, LI Xialin, et al. Real-time digital simulator based digital-analog hybrid simulation experimental platform for a microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 82-92.
- [22] 王凌, 李培强, 李欣然, 等. 微电源建模及其在微电网仿真中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(3): 32-38.
- WANG Ling, LI Peiqiang, LI Xinran, et al. Modeling of micro-powers and its application in micro-grid simulation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(3): 32-38.
- 邓皓(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电与控制技术。