

风电海水淡化孤立微电网的运行与控制

张祥宇¹, 王慧¹, 樊世通¹, 王琛², 张玉婷²

(1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003;
2. 国网连云港供电公司, 江苏 连云港 222000)

摘要: 大型离网风机与高耗能的海水淡化装置联合运行将是未来淡水清洁生产技术的开发方向之一。首先根据海水淡化的负荷特性及风电的运行特性, 分析含风电、储能、海水淡化负荷的孤立微电网的运行模式及控制方案。在此基础上, 根据风速历史数据, 计算机组出力及风功率波动的概率分布, 提出风电、储能和海水淡化装置的容量配置方案以及孤立微电网协调运行的控制策略, 进而提高系统经济效益和安全稳定运行能力。最后基于PXI+cRIO的仿真试验系统搭建某地区海岛微电网, 针对风电海水淡化孤立系统不同运行工况进行实时仿真, 验证了所提控制策略的可行性。

关键词: 微电网; 风力发电; 海水淡化; 容量配置; 协调控制

Operation and control of isolated microgrid with wind turbines and seawater desalination equipments

ZHANG Xiangyu¹, WANG Hui¹, FAN Shitong¹, WANG Chen², ZHANG Yuting²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. State Grid Lianyungang Power Supply Company, Lianyungang 222000, China)

Abstract: The combined operation of large-scale off-grid wind turbines and energy-intensive seawater desalination equipments will be one of the directions of the cleaner freshwater producing technology in the future. Based on load characteristics of seawater desalination devices and operating characteristics of wind power, the operation modes and control strategies of isolated microgrid with wind power, energy storage and seawater desalination equipments are discussed firstly. On this basis, the unit outputs and the probability distributions of wind power fluctuation are calculated according to historical data of wind speed, and then the capacity configuration of wind power, energy storage and seawater desalination devices and the coordinated control strategy of isolated microgrid to enhance the economical efficiency and stability of the system are proposed, respectively. Finally, a digital-analog simulation platform is built based on PXI+cRIO. The real-time simulation result for various operating modes of this isolated microgrid system verifies the feasibility of the proposed control strategies.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277072) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2014MS97).

Key words: microgrid; wind power; seawater desalination; capacity configuration; coordinated control

中图分类号: TM614 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)04-0025-07

0 引言

2013年全球风电新增装机容量为35.5 GW, 累计装机容量已达到318 GW^[1]。而我国目前风电的总装机和新增容量均居世界第一, 2013年中国风电装机容量达到了91.4 GW, 已成为我国第三大电源。然而, 随着电网中风电的装机容量及比例的不断提

高, 产能不均衡所引起的风功率输送、消纳等并网瓶颈问题已逐渐凸显^[2-4]。为降低“弃风”损失, 近年来风电离网技术的开发和应用引起了电力行业的广泛关注^[5-6]。

将非并网风电与高耗能工业结合将成为未来解决风电消纳和降低工业生产成本的可行方案之一^[7-9]。如用于保障沿海地区水资源可持续利用的海水淡化系统, 其生产特性适于与风电、光伏等新能源联合运行, 而高能耗的反渗透工艺可有效消纳离网风电, 成为非并网风电开发应用的新领域。由于

基金项目: 国家自然科学基金项目(51277072); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2014MS97)

海水淡化系统一般装设在地理位置偏远且电网薄弱的地区，因而需为其建立孤立微电网，若分布式电源比例较大，还需引入储能设备，以满足微网安全运行及淡水产量等相关技术要求^[10-12]。目前针对含风、光、储、柴等多能源的海岛微电网的结构拓扑、容量配置及协调控制等技术问题已初步得到解决。如文献[13-14]分别给出了东福山岛及我国东部某岛的微电网的拓扑结构和运行策略。文献[15]通过建立包括投资成本和不同费用的经济性模型，计算微网中风电、柴油机和蓄电池容量的合理配置方法。为进一步解决海岛微电网的供电及淡水需求，文献[16-17]针对含海水淡化负荷的孤立微电网设计了风电、柴油机和蓄电池的控制策略，而文献[18-19]基于各微源和海水淡化的控制策略提出了微电网能量优化配置方案。文献[20-21]则提出了含海水淡化负荷的微电网实时能量管理调度策略，使系统运行更具安全、经济特性。上述研究探讨了微网在联网、孤岛状态下的运行特性及相关控制策略，但并未针对海水淡化可调的负荷特性建立动态模型，因而系统中微源、储能与负荷间的实时协调控制仍需深入研究。若海水淡化容量比重较高，微电网需根据其负荷特性设计系统容量配置方案以及各微源及储能单元的动态调节控制策略。

为改善微电网中风电-海水淡化的联合运行特性，本文建立了由双馈风电机组、蓄电池和海水淡化组成的孤立微电网模型，并根据海水淡化的负荷特性，提出了微电网中风电、储能和负荷的容量配置方案及协调控制策略。最后搭建了基于面向仪器系统的 PCI 扩展(PCI eXtensions for Instrumentation, PXI)+cRIO 的仿真试验平台，针对在所提控制策略下孤立微电网的不同运行工况进行了实时仿真，验证了模型及协调控制策略的可行性。

1 风电海水淡化微电网拓扑与建模

图 1 为本文建立的风储海水淡化孤立微电网拓扑结构图，包括双馈风电机组、蓄电池组和海水淡化装置，均通过电力电子变流器接入系统。

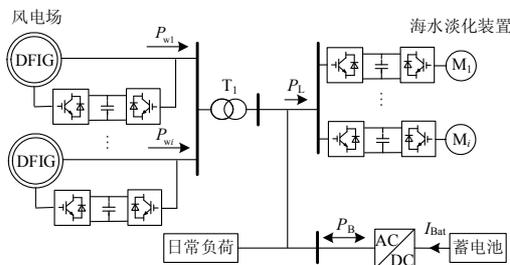


图 1 孤立微电网拓扑结构图

Fig. 1 Structure diagram of stand-alone microgrid

(1) 风电机组

双馈风电机组在传统最大功率跟踪控制下，不仅具有变速恒频的运行特性，并且能够独立控制机组的有功功率和无功功率。为充分利用地域内的风电资源，海水淡化微电网内的风电机组应长期处于捕获最大风能运行状态，并可根据系统需求且在自身功率裕量范围内，利用其无功功率的动态调节能力维持系统电压稳定。

(2) 储能系统

微电网中的储能单元采用功率型锂电池组，用于平抑风电高渗透率下的系统功率波动。由于微电网中风电装机比例较高的双馈风电机组并网安全要求系统具有稳定的频率和电压质量，因而经变流器接入系统的蓄电池组将作为主电源，在恒压恒频控制下，利用其快速的有功、无功调节能力，实时补偿风功率与海水淡化间的功率差额，动态维持孤立微电网的电压和频率质量。此外，由于风功率波动剧烈，可能引起蓄电池频繁进行深度充放电，为延长其使用寿命，需要合理地设定储能系统 SOC 变化区间，并利用海水淡化的可调负荷特性，有效减小蓄电池的功率调节压力。

(3) 海水淡化系统建模

海水淡化装置主要由给水泵、高压泵、反渗透 RO 单元和能量回收装置等设备组成，各水泵通过变频器接入微电网，成为了负荷能耗的主要来源。因此，海水淡化装置可用背靠背双 PWM 全控整流桥+异步电动机+RO 单元的拓扑结构近似模拟其负荷特性，而全控型变流器能够避免谐波对微电网安全运行的不利影响。

图 2 为反渗透海水淡化的主要工艺流程，系统通过改变 RO 膜两侧压力差 $p_r - p_f$ 产出淡水，即高压泵和升压泵通过转速调节，控制出水压力和淡水流量 Q_p 。因此，本文针对上述海水淡化系统的控制流程建立了如图 3 所示的闭环控制系统。其中，水泵轴功率与压力差的关系可由式(1)表示。

$$\Delta p = P \cdot \eta / Q \tag{1}$$

式中： P 为水泵功率； Q 为进水体积流量； η 为电机效率。

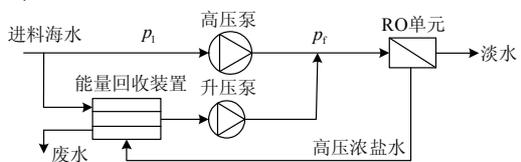


图 2 海水淡化装置结构图

Fig. 2 Structure diagram of sea water desalination equipment

如图3所示,机侧变流器在矢量控制下,独立调节电动机的有功、无功功率,实现变频调速的控制目标。为模拟高压泵输出功率与出水压力之间的关系,本文建立了以高压泵进出口压力差为控制目标的压力外环控制,通过PI控制器实现无差调节,进而为电动机转速提供参考,并根据期望转矩计算有功电流参考值 i_{sq}^* ,而定子电流的励磁分量 i_{sd}^* 则由弱磁控制模块给出。此外,网侧变流器主要功能是控制变流器电容器电压恒定。

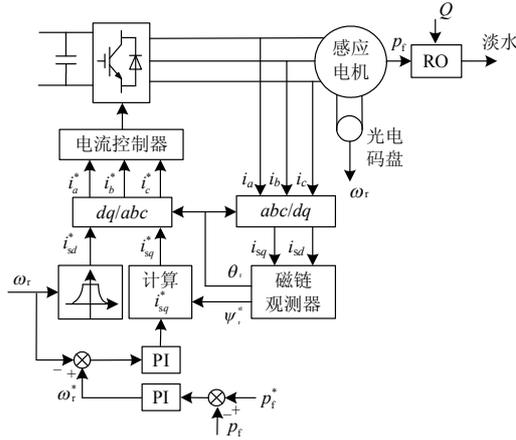


图3 海水淡化装置控制结构图

Fig. 3 Control diagram of sea water desalination equipment

2 系统容量配置及协调运行控制策略

2.1 微电网容量配置

(1) 风电机组

本文采用盐城射阳测风数据,高度70 m,采集时间为2012年3月17日18:00~2013年4月22日23:50,时间间隔为10 min,风速分布如图4所示。

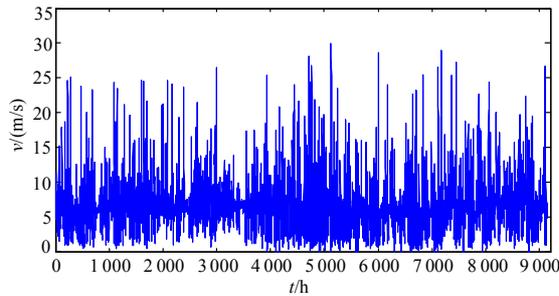


图4 风速分布图

Fig. 4 Distribution of wind speed

根据风电数据,可利用式(2)计算风电机组的功率^[22]输出为

$$P_w = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_i \\ A + Bv^3 & v_i \leq v \leq v_N \\ P_N & v_N \leq v \leq v_o \\ 0 & v > v_o \end{cases} \quad (2)$$

式中: v_i 、 v_N 、 v_o 分别为切入风速、额定风速和切出风速; P_N 为机组额定功率; $A = P_N v_i^3 / (v_i^3 - v_N^3)$;
 $B = P_N / (v_N^3 - v_i^3)$ 。

由风速数据和式(2)可得出风电机组的出力概率分布,见表1。

表1 风电机组出力分布概率

Table 1 Probability distribution of wind turbines' output power

出力/%	概率/%
0~30	74.94
30~60	11.94
60~100	13.12

将图4中每个采样点的风速数据分别代入式(2),即可计算出全年风功率数据 $P_{w,i}$,则风电机组的平均出力可由下式计算。

$$P_{w,avg} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{w,i}}{n} \quad (3)$$

式中: $P_{w,avg}$ 为风电机组平均出力; n 为风速数据采样点数。

由式(3)可计算出风电容量配置为3 MW时,平均出力约为710 kW。此外,由表1可知,风电机组出力不足30%时的概率达到了74.94%。因而,本文选取2台1.5 MW机组用以满足4套50 t海水淡化装置的负荷需求,其中每套海水淡化装置的额定功率约为152 kW。

(2) 储能系统

储能系统在微电网动态调节过程中用于补偿风电与负荷间的功率差额,此外海水淡化系统启动同样需要储能,首先建立电压。由于海水淡化负荷调节速度较慢,因而储能需具备平抑风功率波动的能力。基于风速数据,利用式(2)可进一步计算出风功率波动幅度的概率分布,见表2。

表2 风电功率波动幅度概率分布

Table 2 Probability distribution of wind power fluctuation

波动范围/ kW	波动概率/ %	波动范围/ kW	波动概率/ %
[-1200, -900)	1.22	[0,300)	57.51
[-900, -600)	4.27	[300,600)	4.66
[-600, -300)	4.58	[600,900)	4.34
[-300,0)	11.54	[900,1200)	1.26

储能单元变流器容量可根据风功率波动幅度的概率合理配置,使其具备保持微电网电能质量的能力。由表2可知,风功率波动范围为[-300,300)的概率为69.05%,而变化达到[-600,600)的概率为

78.29%。由上述分析,若变流器容量配置为 600 kW,则概率为 70%以上的风功率波动可得到平抑,基本满足了功率调节对储能的功能要求。

在微电网中储能单元还需承担海水淡化装置的启动任务。表 3 为海水淡化主要设备技术要求,根据各水泵容量和启动时间,可计算出蓄电池所需容量,本文针对 4 套海水淡化装置设计的蓄电池容量为 293.5 kWh。

表 3 50 t 海水淡化主要设备参数表

Table 3 Parameters of 50 t sea water desalination equipment

设备名称	原水加压泵	高压泵	PX 增压泵
容量/kW	18.5×1	37×3	7.5×3
启动顺序/时间/s	1/1	3/10	2/10
停机顺序/时间/s	3/1	1/10	2/10
启动时间间隔/min	10	10	10

2.2 协调控制策略

微电网海水淡化系统中风电作为主电源为负荷供电,而储能系统则为主控单元,在恒压恒频控制下,维持系统功率平衡,同时为双馈风电机组并网提供电压和相角参考。本文在微电网海水淡化系统中建立了主从控制模式,对各微电源和海水淡化负荷进行协调控制,优化系统运行方式,并保证其安全稳定运行,具体控制策略如下。

(1) 风电功率 P_W 能够满足一级负荷 P_0 和海水淡化设备 P_L 功率需求,即 $P_W \geq P_0 + P_L$ 。

该运行工况下,为提高风电能源利用效率,需计算风电与负荷的功率差额,并检查蓄电池 SOC 的荷电状态,即

$$\Delta P = P_W + P_B - P_0 - P_L \quad (4)$$

式中, P_B 为蓄电池侧变流器功率。

① $SOC < SOC_{max}$, ΔP 将对蓄电池充电,若 ΔP 超过蓄电池最大充电功率 $P_{BN} - P_B$,则剩余功率 $\Delta P - (P_{BN} - P_B)$ 需通过卸载负荷释放或风电机组利用变桨技术减功率运行。

② $SOC = SOC_{max}$, 蓄电池无法充电,多余功率 ΔP 需接入卸载电路释放或通过变桨系统使风电机组减载运行。

(2) 风电无法满足负荷需求,即 $P_W < P_0 + P_L$ 。

① $SOC > SOC_{min}$, 通过蓄电池放电保证系统功率平衡;

② $SOC = SOC_{min}$, 需要海水淡化减负荷运行,若其功率减至最小值 P_{Lmin} 仍不能使系统恢复功率平衡,则需切除负荷 P_{Lmin} ,海水淡化停机。

由上述分析可得,所提微电网协调运行控制策略具体流程如图 5 所示。

3 基于 PXI 的孤立微电网数模混合仿真分析

3.1 系统简介

为模拟实际工程,本文基于 PXI+cRIO 的仿真试验系统,搭建了如图 1 所示的风电海水淡化孤立微电网的仿真模型,利用 cRIO 与 PXI 之间的数据

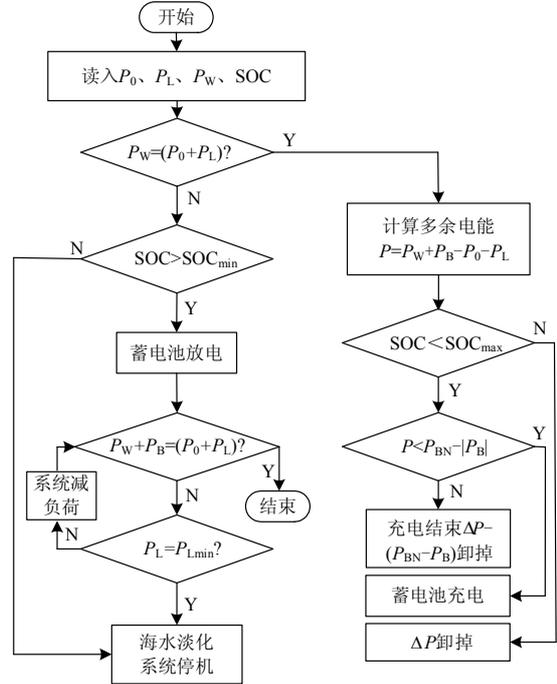


图 5 微电网协调控制流程图

Fig. 5 Coordinated control diagram of microgrid

交互,实时采集数据,并实现微网控制器与仿真系统间的闭环控制,进而对所提协调运行控制策略进行实时测试,仿真平台结构如图 6 所示。其中,风电场包含 2 台×1.5 MW 双馈风电机组,蓄电池容量为 293.5 kWh,4 套日产量 50 t 的海水淡化装置,容量为 608 kW,负荷主要设备运行参数见表 3。



图 6 微电网仿真试验平台

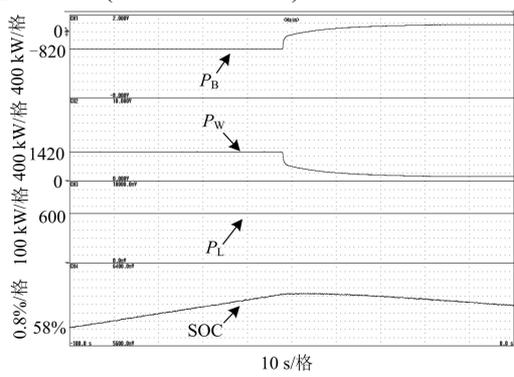
Fig. 6 Simulation platform of microgrid

为模拟海水淡化负荷特性对微电网稳定运行的影响,根据其生产工艺,本文通过控制其功率梯级变化时的变化率,模拟水泵启停机过程,即海水淡化负荷可调的动态响应特性。

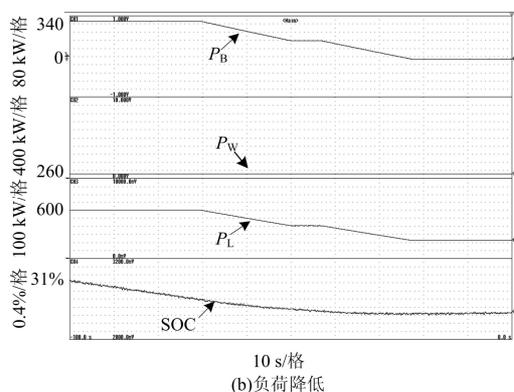
3.2 风速减小后的实时仿真分析

初始风速为 8 m/s, 海水淡化满负荷运行, 蓄电池 SOC 为 58%, 48.0 s 时刻风速突变为 5 m/s, 造成系统有功功率不足后, 微电网启动协调控制策略, 当蓄电池放电导致 SOC 跌落至 30% 时, 降低系统负荷功率, 仿真结果如图 7 所示。图 7(a)、图 7(b) 分别给出了风速和系统负荷开始降低时蓄电池侧变流器功率 P_B 、风电机组功率输出 P_w 、海水淡化负荷功率 P_L 和蓄电池 SOC 的动态响应。

由图 7(a) 可看出, 初始风速下, 风电可以满足海水淡化的最大负荷需求 ($P_L=600$ kW), 并且多余的电能将给蓄电池充电 ($P_B<0$), 蓄电池 SOC 持续上升; 48.0 s 时刻风速降低后, 风电机组功率输出快速减小, P_w 由 1 420 kW 逐渐降低至 260 kW, 此时风电机组的功率已不足以满足最大负荷需求, 蓄电池单元在恒压恒频控制策略下, 根据系统运行状态, 利用存储的能量持续放电, 满足海水淡化的最大产能需求。然而, 由于风功率持续降低, 蓄电池无法满足负荷需求, 开始持续放电 ($P_B>0$), 最终导致 SOC 跌落至 30%, 如图 7(b) 所示。此时微电网中央控制器制定功率控制指令, 降低负荷功率, 由 P_L 的动态响应可以看出, P_L 首先按照整定的变化率下降至额定值的 70% (高压水泵切除), 虽然负荷需求下降,



(a) 风速降低



(b) 负荷降低

图 7 海水淡化孤立微电网的动态响应

Fig. 7 Dynamic responses of stand-alone microgrid

但蓄电池 SOC 仍持续降低, 负荷降低的变化量并未实现系统重建功率平衡, 因此海水淡化系统再次调整功率需求, 降至额定容量的 40%, 由 SOC 动态响应可以看出, 负荷再次调整已补偿了风速变化引起的风功率变化量, 蓄电池停止放电, 并开始缓慢充电 ($P_B<0$)。

3.3 风速增加后的实时仿真分析

初始风速为 4 m/s, 海水淡化减载 40% 运行, 蓄电池处于放电状态, 29.0 s 时刻风速突变为 7 m/s, 造成系统有功功率过剩后, 微电网启动协调控制, 仿真结果如图 8 所示。

由图 8 可看出, 风电机组处于风速 4 m/s 时, 仅能满足海水淡化系统的最低负荷需求, 并且需要蓄电池充电补充系统的功率缺额 ($P_B>0$), SOC 持续降低; 29.0 s 时刻风速增加至 7 m/s 后, 风电机组功率输出快速抬升, P_w 由 40 kW 增加至 920 kW, 此时风电机组的功率可以支持海水淡化的最大负荷需求, 并且变流器开始为蓄电池充电 ($P_B<0$), SOC 逐渐升高。微电网中央管理器检测 SOC 信号满足充放电需求, 且变流器充电功率可以满足海水淡化, 15 s 左右下发控制指令, 海水淡化增加功率需求, P_L 由 240 kW 逐渐增加至 600 kW, 进入最大负荷运行状态。

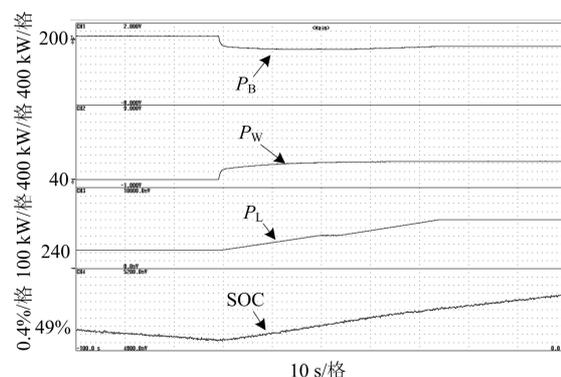


图 8 风速增加后海水淡化孤立微电网的动态响应

Fig. 8 Dynamic responses of stand-alone microgrid after wind speed increase

3.4 变风速下的实时仿真分析

风速曲线如图 9 所示。图 10 给出了变风速下时间尺度为 1 h, 风电海水淡化孤立微电网的实时动态响应。

如图 10 所示, 5~25 min 时间段内, 风速不足, 导致储能系统始终处于放电状态, 25 min 之后, 蓄电池 SOC 已至最低限, 海水淡化装置减负荷运行, 且满足 10 min 启停时间间隔。在负荷降功率的时间段内, 平均风速相对升高, 蓄电池处于充电状态,

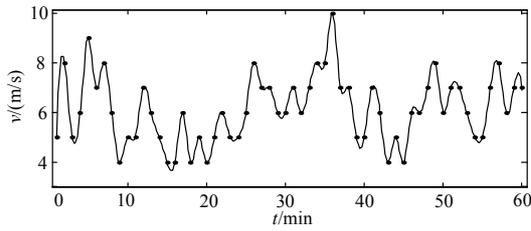


图 9 风速变化曲线

Fig. 9 Variable wind speed curve

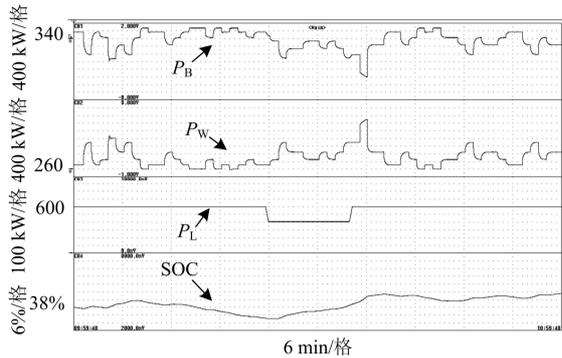


图 10 变风速下海水淡化孤立微电网的动态响应

Fig. 10 Dynamic responses of stand-alone microgrid with variable wind speed

35 min 时刻，高压泵成功启动，海水淡化装置恢复最大功率运行状态。35 min 之后，在所提协调控制策略下，蓄电池组在安全充放电范围内能够平抑风功率波动，满足了微电网安全稳定的运行需求。

4 结论

基于风电海水淡化孤立微电网，本文提出了风电、储能、海水淡化负荷的容量配置方案及系统协调运行控制策略。实时仿真试验结果表明，在本文建立的高风电渗透下的孤立微电网中，各设备运行稳定，其中储能系统可利用其功率调节能力，动态补偿风电与负荷间的功率差额，维持系统安全运行，而与可调负荷的协调配合，则能够更好地实现高效利用近海风能满足海水淡化负荷需求，以及有效延长蓄电池使用寿命等控制目标。

本文研究内容为离网风电与海水淡化联合系统的工程建设提供了技术参考。下一步研究工作还需开发包含海水淡化负荷调度、故障保护及经济评价等功能的能量管理系统。

参考文献

[1] Global wind statistics 2013[R]. Brussels: Global Wind Energy Council, 2014.
 [2] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2012, 30(25):

1-9.
 ZHANG Liying, YE Tinglu, XIN Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 30(25): 1-9.
 [3] ROGÉRIO G, ALMEIDA D, PEÇAS LOPES J A. Participation of doubly fed induction wind generators in system frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(5): 944-950.
 [4] 李和明, 董淑惠, 王毅. 永磁直驱风电机组低电压穿越时的有功和无功协调控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 73-81.
 LI Heming, DONG Shuhui, WANG Yi. Coordinated control of active and reactive power of PMSG-based wind turbines for low voltage ride through[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 73-81.
 [5] 许昌, 李旻, 任岩, 等. 孤岛风柴蓄复合发电功率粒子群优化分配研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 85-92.
 XU Chang, LI Min, REN Yan, et al. Research on wind-diesel-storage power generation using PSO in a solitary island[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 85-92.
 [6] 张项安, 张新昌, 唐云龙, 等. 微电网孤岛运行的自适应主从控制技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 81-86.
 ZHANG Xiang'an, ZHANG Xinchang, TANG Yunlong, et al. Research on adaptive master-slave control of the islanded micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 81-86.
 [7] OH H J, HWANG T M, LEE S. A simplified simulation model of RO systems for seawater desalination[J]. Desalination, 2009, 238(1): 128-139.
 [8] YOSHIHARA T, YOKOYAMA A, IMANAKA M, et al. A new method for securing regulating capacity for load frequency control using seawater desalination plant in small island power system[C] // Proceeding of POWERCON, 2010: 1-6.
 [9] GEISLER P, KRUMM W, PETERS T. Optimization of the energy demand of reverse osmosis with a pressure-exchange system[J]. Desalination, 1999, 125(1): 167-172.
 [10] 朱博, 陈民铀, 徐瑞林, 等. 孤岛模式下的微网优化运行策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 35-40.
 ZHU Bo, CHEN Minyou, XU Ruilin, et al. An optimal operation strategy of islanded microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 35-40.

- [11] 李承熹, 杨强, 颜文俊. 含分布式光伏电源的微电网孤岛动态运行策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 99-103.
LI Chengxi, YANG Qiang, YAN Wenjun. Dynamic islanding operation of microgrid with distributed photovoltaic generators[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 99-103.
- [12] 唐西胜, 邓卫, 齐智平. 基于储能的微网并网/离网无缝切换技术[J]. 电工技术学报, 2011, 26(增刊1): 279-284.
TANG Xisheng, DENG Wei, QI Zhiping. Research on grid-connected /islanded seamless transition of microgrid based on energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(S1): 279-284.
- [13] 赵波, 张雪松, 李鹏, 等. 储能系统在东福山岛独立型微电网中的优化设计 and 应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 161-167.
ZHAO Bo, ZHANG Xuesong, LI Peng, et al. Optimal design and application of energy storage in dongfushan island stand-alone microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 161-167.
- [14] 李洋, 刘海涛, 吴鸣, 等. 微电网能量管理系统开发与应用[J]. 华东电力, 2013, 41(5): 1071-1074.
LI Yang, LIU Haitao, WU Ming, et al. Development and application of microgrid energy management system[J]. East China Electric Power, 2013, 41(5): 1071-1074.
- [15] 丁明, 王波, 赵波, 等. 独立风光柴储微网系统容量优化配置[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 575-581.
DING Ming, WANG Bo, ZHAO Bo, et al. Configuration optimization of capacity of standalone PV-wind-diesel-battery hybrid microgrid[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 575-581.
- [16] 刘梦璇, 郭力, 王成山, 等. 风光柴储孤立微电网系统协调运行控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 19-24.
LIU Mengxuan, GUO Li, WANG Chengshan, et al. A coordinated operating control strategy for hybrid isolated microgrid including wind power, photovoltaic system, diesel generator, and battery storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 19-24.
- [17] PAN Yuan, LI Peiqiang, LI Xinran, et al. Strategy of research and application for the microgrid coordinated control[C] // Advanced Power System Automation and Protection (APAP), 2011 International Conference on. IEEE, 2011, 2: 873-878.
- [18] 王新刚, 艾芊, 徐伟华, 等. 含分布式发电的微电网能量管理多目标优化[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 79-83.
WANG Xingang, AI Qian, XU Weihua, et al. Multi-objective optimal energy management of microgrid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20): 79-83.
- [19] 牛焕娜, 黄秀琼, 杨仁刚, 等. 微电网能量管理系统功能结构体系研究与设计[J]. 可再生能源, 2013, 31(6): 47-51.
NIU Huanna, HUANG Xiuqiong, YANG Rengang, et al. Research and design of functional architecture system in microgrid energy management system[J]. Renewable Energy Resources, 2013, 31(6): 47-51.
- [20] 张建华, 于雷, 刘念, 等. 含风/光/柴/储及海水淡化负荷的微电网容量优化配置[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 102-112.
ZHANG Jianhua, YU Lei, LIU Nian, et al. Capacity configuration optimization for island microgrid with wind/photovoltaic/diesel/ storage and seawater desalination load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 102-112.
- [21] 郭力, 王蔚, 刘文建, 等. 风柴储海水淡化独立微电网系统能量管理方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 113-121.
GUO Li, WANG Wei, LIU Wenjian, et al. The energy management method for stand-alone wind/diesel/battery/sea-water desalination microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 113-121.
- [22] 周玮, 孙辉, 顾宏, 等. 计及风险备用约束的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 47-55.
ZHOU Wei, SUN Hui, GU Hong, et al. Dynamic economic dispatch of wind integrated power systems based on risk reserve constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 47-55.

收稿日期: 2014-05-12

作者简介:

张祥宇(1984-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为风力发电控制技术; E-mail: zh.xy.sq@163.com

王慧(1982-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为风力发电控制技术、电力电子在电力系统中的应用;

樊世通(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为风力发电控制技术。

(编辑 姜新丽)