

# 风储海水淡化孤立微电网运行与控制实时仿真试验研究

付超<sup>1</sup>, 廖仰凯<sup>1</sup>, 樊世通<sup>1</sup>, 李春来<sup>2</sup>

(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. 青海省光伏发电并网技术重点实验室, 青海 西宁 810000)

**摘要:** 建立风储海水淡化孤立微电网对于海岛地区可再生能源的利用、淡水资源的供给都具有重要意义。搭建基于PXI和PC的实时仿真平台,对风储海水淡化孤立微电网运行与控制进行了实时仿真试验研究。介绍了实时仿真平台的搭建、各部分数字仿真模型的建立并详细阐述了孤立微电网协调控制方案。该协调控制方案利用海水淡化负荷的可控性,协调控制超级电容、锂电池储能,维持孤立微电网的功率平衡与稳定。最后,通过实时仿真实验验证了所提出的协调控制方案的可行性。

**关键词:** 微电网; 实时仿真; 超级电容; 锂电池; 海水淡化系统; 协调控制

## Real-time simulation test and research of operation and control of isolated microgrid including wind power, storage and seawater desalination load

FU Chao<sup>1</sup>, LIAO Yangkai<sup>1</sup>, FAN Shitong<sup>1</sup>, LI Chunlai<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electrical Power University, Baoding 071003, China; 2. Qinghai Province Key Laboratory of Photovoltaic Grid Connected Power Generation Technology, Xining 810000, China)

**Abstract:** The establishment of isolated microgrid including wind power, storage and seawater desalination load is of significant important to the use of renewable energy and the supply of fresh water resources in island region. A real-time simulation platform based on PXI and PC is built to test the operation and control of the isolated microgrid. The construction of the real-time simulation platform and the digital simulation model is introduced respectively. A coordinated control scheme of the microgrid is discussed in detail. It makes use of the controllability of seawater desalination load, coordinates supercapacitor and lithium-ion battery energy storage so as to maintain the balance and stability of isolated microgrid. Finally, the simulation results show that the feasibility of the proposed coordinated control scheme.

This work is supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 12MS110 and No. 13MS74).

**Key words:** microgrid; real-time simulation; supercapacitor; lithium-ion battery; seawater desalination; coordinated control

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)14-0041-07

## 0 引言

近年来,海岛保护与开发越来越受到国家重视,海岛开发得到快速发展。多数海岛及周围拥有丰富的新能源,通过大力发展海岛电网,对海岛新能源进行合理利用,不仅能够解决海岛化石燃料短缺、运输困难等问题,也可以提高海岛电网电能质量,

对保护海洋环境、促进节能减排也具有重要意义<sup>[1]</sup>。海水淡化技术是解决海岛用水的主要方式之一。然而,海水淡化系统具有高耗能的特点,众多海水淡化机组的引入,会带来大量的能源消耗和严重的环境污染<sup>[2]</sup>。建立由风力发电机组、储能系统及海水淡化负荷组成的微电网<sup>[3]</sup>,不仅能实现海岛淡水的正常供给,还可以充分利用海岛新能源,减少环境污染。因此,建立风储海水淡化孤立微电网具有重要的现实意义。

针对此类微电网，已有学者在能量管理、协调控制方面做了深入研究。文献[4]通过对短期内风机出力 and 负荷需求进行预测，提前制定储能系统的充放电计划，保证微电网经济运行。文献[5]提出以保证孤立系统长期稳定运行、提高系统全寿命周期经济性为目标的风光柴储孤立微电网系统协调运行控制策略。上述文献均采用离线仿真软件对所提出的能量管理、协调控制策略进行验证。建立基于 PXI 的实时仿真平台对微电网进行实时运行与控制方面的研究，能够测试协调控制、能量管理策略的效果，对于微电网的现场运行具有一定的指导意义。

本文以风储海水淡化孤立微电网为对象，构建基于 PXI 和 PC 的实时仿真试验平台。整个实时仿真系统为模拟工程实际采用分层结构，其中仿真控制对象即微电网模型和就地控制器，将部署在实时仿真平台 PXI 上，PXI 实时数字仿真平台完成孤立微电网数字模型部分的实时计算，而微电网监控部分和能量管理系统则部署在 PC 机上。提出了孤立微电网协调控制策略，并在实时仿真平台的基础上对不同运行情况进行了实时仿真试验研究，验证了该协调控制策略的可行性。

### 1 基于 PXI 的实时仿真实验平台的搭建

本文所提出的基于 PXI 和 PC 的实时仿真平台结构如图 1 所示。各部分功能描述如下。

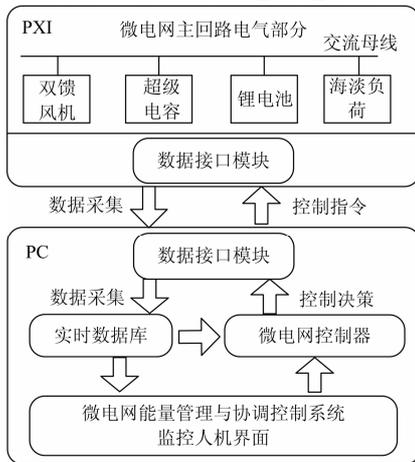


图 1 实时仿真平台结构图

Fig. 1 Structure of real-time simulation platform

(1) PXI 实时仿真系统。对整个微电网结构和各分布式电源、负荷的主回路电气部分和相关控制系统进行实时数字仿真模拟，并通过数据接口模块与 PC 机上的监控系统进行实时数据交互，接收监控系统发出的控制信号，实现软、硬件结合的闭环仿真。利用 Matlab/Simulink 搭建整个微电网的平均值模型，在 PXI 平台上进行部署，从而实现整个系统的

实时数字仿真模拟。

(2) 联合系统人机监控软件。它是整个实时仿真实验平台的重要组成部分，通过和 PXI 实时仿真系统数据接口模块的连接，实时监测微电网的运行状态并下达负荷投切等控制指令。

### 2 风储海水淡化孤立微电网实验平台构建

由于风功率具有间歇性和随机性的特点，本文考虑加入储能装置来提高孤立微电网的稳定性。受储能机理的影响，电池储能<sup>[6-7]</sup>具有能量密度高、功率密度低、循环使用寿命短的特点；超级电容<sup>[8]</sup>具有功率密度高、响应速度快、循环使用寿命长、能量密度低的特点。对此，本文采用锂电池与超级电容组成的混合储能系统<sup>[9-11]</sup>，发挥二者性能上的互补性来提高储能系统的性能。孤立微电网中负荷仅为海水淡化负荷，其对电能可靠性要求较低，不需要电能的持续供应且可以在一定程度内进行调节。本文研究的风储海水淡化孤立微电网结构如图 2 所示，包括双馈风力发电机组，超级电容储能，锂电池储能及反渗透海水淡化负荷。

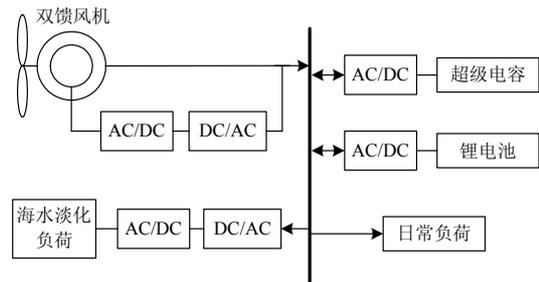


图 2 风储海水淡化孤立微电网结构图

Fig. 2 Configuration of a wind-battery-seawater desalination microgrid

#### 2.1 Matlab 数字仿真系统

##### 2.1.1 双馈风力发电机

为尽可能地利用风力资源，系统以风力发电为主。因风能具有随机性、波动性的特点，本文风机采用最大功率跟踪<sup>[12-13]</sup>(Maximum Power Point Tracking, MPPT)控制策略，以最大效率利用风能。

##### 2.1.2 超级电容储能

超级电容属于功率型储能装置，在系统功率变化较大的情形下可以很快补偿功率差额，其变流器采用变频控制<sup>[14-16]</sup>(V/f control)。目的是当电压和频率发生偏差时，在其功率和容量可调范围内实时调整输出的有功无功，为系统提供电压和频率支撑。

##### 2.1.3 锂电池储能

锂电池属于能量型储能装置，可以完成较长时间尺度的功率调节。其控制采用定功率控制<sup>[17-19]</sup>

(PQ control), 按照给定的功率参考值输出有功和无功。本文锂电池在短时的协调控制策略中, 将利用其功率裕量辅助超级电容, 协同参与系统功率调节。

#### 2.1.4 海水淡化负荷

反渗透海水淡化系统主要由高压泵、升压泵、反渗透(reverse osmosis, RO)单元和能量回收装置组成。其中, 高压泵、升压泵作为主要耗能设备将在海水淡化负荷建模中作为系统负荷。通过异步电动机+变频器模拟的海水淡化系统谐波含量较大, 为消除谐波, 本文采用异步电动机+背靠背双PWM全控整流桥结构。根据5 t反渗透海水淡化装置电负荷<sup>[20]</sup>, 并考虑一定的日常负荷, 建立如图3所示的由三台异步电动机与日常负荷组成的海水淡化负荷。

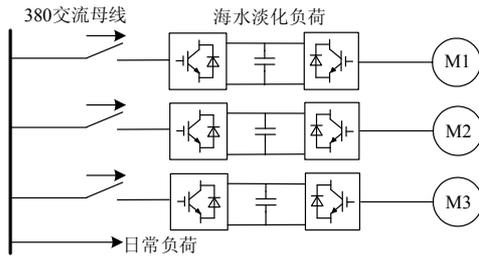


图3 海水淡化负荷结构图

Fig. 3 Structure of seawater desalination load

## 2.2 协调控制方案

### 2.2.1 系统功率平衡分析

本文考虑的功率平衡关系中, 主要考虑有功功率平衡(系统中较小的无功功率缺额全部由超级电容提供)。因此, 系统功率平衡关系可表示为

$$P_{dl} + P_L = P_b + P_c + P_w \quad (1)$$

式中,  $P$  代表有功功率, 下标 dl、L、b、c、w 分别表示卸荷负载、海水淡化负荷、锂电池、超级电容、风电。

### 2.2.2 系统运行状态

根据孤立微电网中风机、储能等各单元的工作特性, 将系统运行状态分为以下几种情况。

(1) 充电状态: 当  $P_w > P_L$  时, 若满足超级电容充电条件, 超级电容充电, 锂电池作为辅助, 也开始充电。此时, 功率关系表示为

$$P_b + P_c = P_w - P_L \quad (2)$$

如超级电容或锂电池已充满, 则投入卸荷负载, 消耗多余功率。此时, 功率关系表示为

$$P_b + P_c = P_w - P_L - P_{dl} \quad (3)$$

(2) 放电状态: 当  $P_w < P_L$  时, 若满足超级电容放电条件, 超级电容放电, 锂电池作为辅助, 也开始放电。此时, 功率关系表示为

$$P_b + P_c = P_L - P_w \quad (4)$$

如超级电容或锂电池不能再放电, 则进入切机

状态, 系统停止运行。超级电容能够满足短时的功率缺额且海水淡化负荷并不需要持续的电力供应, 可以出现一定的停机情况。

(3) 平衡状态: 当  $P_w = P_L$  时, 超级电容和锂电池处于待机状态。此时, 功率关系表示为

$$P_b + P_c = P_w - P_L = 0 \quad (5)$$

### 2.2.3 各单元运行约束条件

#### (1) 海水淡化负荷

海水淡化装置的功率有一定范围, 记  $P_{Lmax}$ 、 $P_{Lmin}$  分别为负荷功率的上下限。负荷功率不能低于  $P_{Lmin}$ , 否则淡化装置中电动机功率太低, 将导致淡化产生的淡水水质不达标, 不满足海水淡化的工艺要求, 即

$$P_{Lmin} \leq P_L \leq P_{Lmax} \quad (6)$$

#### (2) 超级电容储能

超级电容作为实时平衡系统功率差的器件, 其运行状态必须在合理范围内, 本文采用荷电状态(SOC)作为其运行状态的标准, 即

$$SOC_{cmin} \leq SOC_c \leq SOC_{cmax} \quad (7)$$

式中,  $SOC_{cmin}$ 、 $SOC_c$ 、 $SOC_{cmax}$  分别表示超级电容 SOC 下限、SOC、SOC 上限。

且其充放电功率不能超过功率额定值( $P_{cN}$ ), 即

$$0 \leq P_c \leq P_{cN} \quad (8)$$

#### (3) 锂电池储能

锂电池作为辅助功率调节器件, 需对其进行充放电控制, 其 SOC 状态必须保持在合理范围内, 即

$$SOC_{bmin} \leq SOC_b \leq SOC_{bmax} \quad (9)$$

式中,  $SOC_{bmin}$ 、 $SOC_b$ 、 $SOC_{bmax}$  分别表示锂电池 SOC 下限、SOC、SOC 上限。

与超级电容类似, 锂电池充放电功率也不能超过功率额定值( $P_{bN}$ ), 即

$$0 \leq P_b \leq P_{bN} \quad (10)$$

#### (4) 风电机组

由于风电机组控制一般采用最大功率跟踪控制策略, 所以当风机输出功率不大于其额定功率即可实现安全运行。考虑风机启停次数对风机寿命的影响, 设置风机的启动与停止条件。

启动条件: 为充分利用风能资源, 当风速大于风机切入风速时, 风机投入使用。

停止条件: 为尽量减少风机的停止次数, 只有当  $P_w$  小于  $P_L$  时, 超级电容或锂电池不能继续放电且海水淡化负荷不可调时, 风机停止运行, 即

$$\begin{cases} P_w < P_L \\ SOC_c < SOC_{cmin} \parallel SOC_b < SOC_{bmin} \\ P_L < P_{Lmin} \end{cases} \quad (11)$$

### 2.2.4 协调控制策略

由于本文重点考虑有功功率平衡关系,所以本文协调控制策略的实质为基于系统有功功率平衡的协调控制。本文孤立微电网中,超级电容类似大电网中的“平衡节点”,快速补偿风电与海水淡化负荷间的功率差额。考虑到该储能元件价格昂贵,能量型的锂电池在协调控制策略中,将利用其功率裕量辅助超级电容,协同参与系统功率调节。其动作频率为每 30 s 改变一次换流站的定功率参考值,即系统每运行 30 s 检测到的负荷与风电的功率差值作为锂电池的输出功率参考值,在 30 s 之内锂电池输出功率保持不变,这段时间系统内较小的功率缺额由超级电容单独承担。该控制策略可以显著降低超级电容的容量配置。协调控制流程图如图 4 所示。

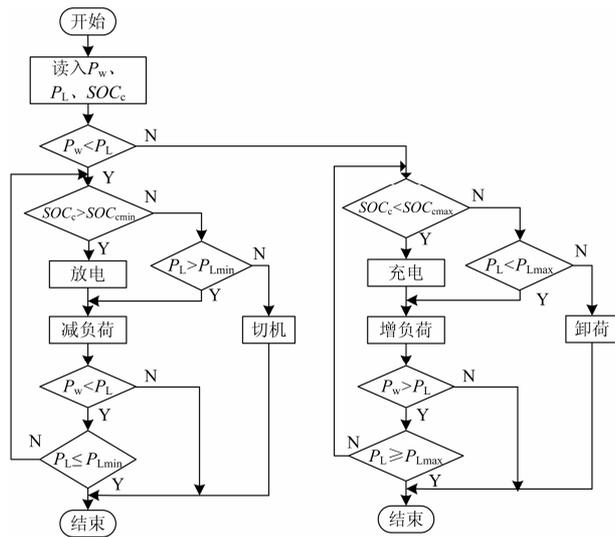


图 4 协调控制流程图

Fig. 4 Flow diagram of coordinated control

(1)  $P_w < P_L$  时,超级电容发出功率来满足此时的功率缺额。若其  $SOC$  高于  $SOC_{cmin}$ ,则由超级电容弥补风功率缺额与风机一起为负荷供电,同时负荷跟随风功率开启减负荷过程以减少储能的压力,避免储能放电过久;若其  $SOC$  已达  $SOC_{cmin}$ ,超级电容不能再继续放电,判断负荷功率是否低于  $P_{Lmin}$ ,高于  $P_{Lmin}$  说明负荷仍具有功率调节能力,可通过减负荷的过程来匹配当前风功率。若此时负荷功率已低于  $P_{Lmin}$ ,说明系统运行到超级电容和负荷都不可调的极端情况,只有进行切机处理。减负荷后判断风功率是否满足此时的负荷功率,若满足则协调控制过程结束,若不满足要判断此时负荷是否达到  $P_{Lmin}$ ,未达下限值就需要重复协调控制过程。

(2)  $P_w > P_L$  时,超级电容吸收多余功率。若其  $SOC$  低于  $SOC_{cmax}$ ,则多余的风能用于对超级电容进行充电,同时为最大化利用风能要让海水淡化装

置增负荷运行;若其  $SOC$  已达  $SOC_{cmax}$ ,则需检查负荷功率是否低于其  $P_{Lmax}$ ,低于  $P_{Lmax}$  说明其可进行增负荷过程,高于  $P_{Lmax}$  说明超级电容和负荷均以最大程度运行,这时投入卸荷负载,卸掉多余风功率。同样的,增负荷后继续比较此时负荷功率和风功率,再判断负荷功率是否达到  $P_{Lmax}$ ,以确定是重复协调控制过程还是结束。

(3)  $P_w = P_L$  时,说明风机功率正好满足负荷功率需求。此时,超级电容处于待机状态。

### 2.3 联合系统人机监控软件

为对联联合系统的监控,本文开发基于 LabVIEW 的联合系统运行监控人机界面。监控软件分为两层:微电网能量管理层、检测与控制执行层。其中能量管理层根据风功率预测与储能装置  $SOC$ ,考虑系统安全稳定运行与经济性,制定海水淡化负荷的投切计划及风机输出功率的限制指令。检测与控制执行层则进行整个系统状态图形化显示,包括系统各单元的运行状态、实时数据和曲线等。

## 3 实时仿真实验

基于本文构建的实时仿真平台,对所研究的风储海水淡化孤立微电网系统进行仿真测试。孤立微电网系统中 5 t 海水淡化负荷与日常负荷为 27.2 kW;根据某地区风速条件统计结果,在一年的周期内风电机组有 66.40% 的概率出力不足 30%,配置 150 kW 的风电机组,其年平均出力约为 42 kW,正好能满足一套 5 t 海水淡化负荷要求;超级电容考虑满足 70% 概率以上的功率突变,并考虑风电预测误差(这里取误差为 5%)及多风机功率互补性(这里取互补系数为 0.95),得到需要满足的风电突变功率为 30 kW,在考虑满足以上风电功率突变及海水淡化系统功率有一定调节能力的基础上,确定其电容值为 20 F;锂电池在考虑平抑风电功率(本文取最大功率波动为 50 kW,即可满足 99.54% 的风电功率波动,平抑时间为 10 min,则平抑风电功率波动的容量为 8.33 kWh)、海水淡化系统安全停机(系统由最大工作状态转为停机所需电能为 3.56 kWh)、控制装置所需电能(为操作站、电动阀门等提供不间断的电力供应,控制装置等的负载功率为 3 kW,维持其正常运行 1 h 所需电能为 3 kWh)三方面的基础上,确定其容量为 32.65 Ah。其中,超级电容逆变器容量为 30 kW,锂电池逆变器容量为 50 kW。

依据超级电容  $SOC$  两种较为典型的状态 (20% $SOC$ 、80% $SOC$ ) 划分,进行了两组 1 小时的实时仿真实验,以验证本文提出的协调控制策略的可行性。实验设定:能量管理系统每 10 min 依据风速情况与  $SOC$  状态,给出海水淡化负荷运行工况指令,即三台电动机负荷的投切指令(1 代表启动,0

代表停止)。实验数据通过监控软件记录, 风机参数详见表 1, 海水淡化系统参数详见表 2。实验结果如图 5、图 6 所示。

表 1 风机参数

Table 1 Parameters of the wind turbine

参数	数值	参数	数值
风机额定功率/kW	75	切出风速/(m/s)	21
风机个数	2	定子侧额定电压/V	575
切入风速/(m/s)	3	双变流器直流电压/V	1 150
额定风速/(m/s)	11	线路滤波电容/var	120

表 2 海水淡化系统参数

Table 2 Parameters of the seawater desalination

参数	数值	参数	数值
电机 1 额定功率/kW	5.5	日常负荷/kW	4
电机 2 额定功率/kW	5.5	电机额定电压/V	380
电机 3 额定功率/kW	12.2	电机额定频率/Hz	50

### 3.1 初始 20%SOC 运行情况

图 5 中, 前 30 min 风速较小, 海水淡化负荷只有一台电动机工作。10~20 min 风机出力下降, 海水淡化负荷功率在其调节范围内也随之减小; 20~30 min 随着风机功率的增加, 海水淡化负荷功率也增加, 说明海水淡化负荷能够根据风功率的变化改变自身功率值, 起到辅助功率调节的作用; 30~50 min 海水淡化负荷全部投入运行, 在其可调

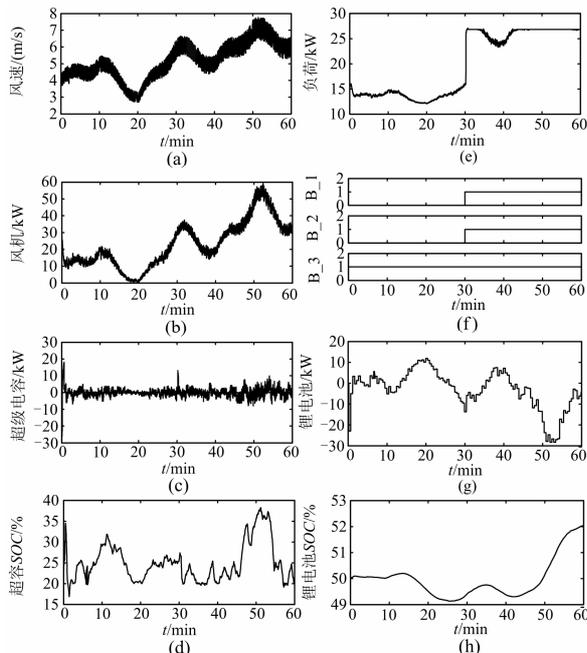


图 5 20%SOC 实时仿真实验

Fig. 5 Simulation results in real time of 20%SOC

范围内, 海水淡化负荷跟踪风机出力变化增加或减小功率, 超出其调节范围, 负荷满载运行; 50~60 min 风机出力较大, 海水淡化负荷一直满载运行, 不参与系统功率调节。锂电池每 30 s 从联合监控系统中得到功率参考指令, 按照风功率与负荷的差值发出或吸收功率, 起到基本的功率调节作用。

### 3.2 初始 80%SOC 运行情况

图 6 中, 前 20 min 海水淡化负荷在其功率可调节范围内随着风机出力的变化改变其功率消耗; 20~45 min 由于风机出力较大, 海水淡化负荷基本处于满载运行状态, 系统功率差额完全由超级电容和锂电池来平衡。这段期间, 由于超级电容 SOC 处于较高水平, 风功率除了满足海水淡化负荷功率需求之外, 主要为锂电池充电。由锂电池 SOC 曲线可知, 其 SOC 呈现上升趋势; 45~60 min 海水淡化负荷跟踪风速变化改变功率消耗, 起到辅助功率调节的作用, 一定程度上分担了储能装置的功率调节压力。

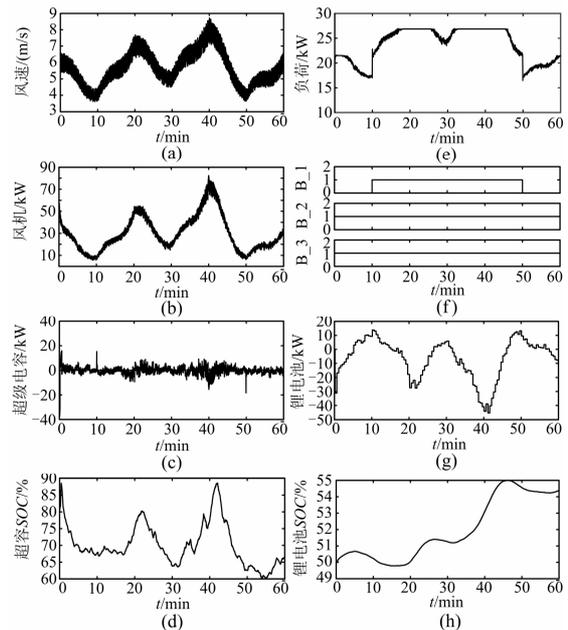


图 6 80%SOC 实时仿真实验

Fig. 6 Simulation results in real time of 80%SOC

### 3.3 短期协调控制验证

为验证本文提出的协调控制策略, 选取情况二中 10 min 左右的一段 90 s 的实时运行结果进行分析。

图 7 中, 50 s 点对应情况 2 中 1 小时曲线 10 min 运行点。因能量管理程序每 10 min 给出控制指令, 所以在 50 s 点海水淡化负荷改变运行工况, 投入一台电动机负荷, 负荷功率瞬时增大。此时, 瞬间功率差由超级电容提供, 其 SOC 降低。锂电池的功率值设定为每 30 s 改变一次, 所以 30~60 s 锂电池的

出力保持不变。60 s之后锂电池改变出力值，承担大部分的功率差额。由此可以看出，本文提出的协调控制策略是可行的，能够维持系统稳定。

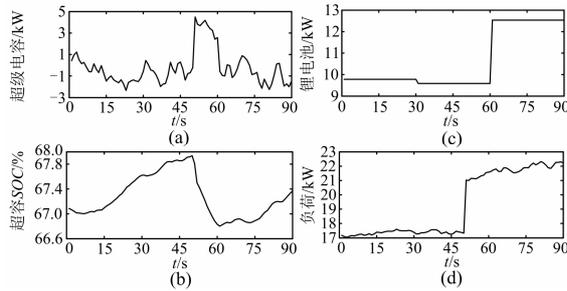


图 7 协调控制分析

Fig. 7 Analysis of coordinated control simulation results

### 4 结论

本文介绍了基于 PXI 的实时仿真平台的搭建、各部分数字仿真模型的建立并详细阐述了功率型储能超级电容建立系统电压和频率，能量型储能锂电池协同参与系统功率调节，海水淡化负荷作为可控负荷辅助系统功率调节的协调控制策略。用搭建的实时仿真平台对该协调控制策略进行了实时仿真实验验证，结果说明了控制策略的可行性。研究结果对于风储海水淡化孤立微电网的运行与控制具有一定的指导作用。

### 致 谢

本文中部分实验数据的测量记录工作是在青海省光伏发电并网技术重点实验室资金支持下完成的，在此向他(她)们表示衷心的感谢。

### 参考文献

[1] 杨欢, 赵荣祥, 辛焕海, 等. 海岛电网发展现状与研究动态[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 95-105.  
 YANG Huan, ZHAO Rongxiang, XIN Huanhai, et al. Development and research status of island power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 95-105.

[2] 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/seawater desalination microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 113-121.

[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] ROSS M, HIDALGO R, ABBEY C, et al. Energy storage system scheduling for an isolated microgrid[J]. IET Renewable Power Generation, 2011, 5(2): 117-123.

[5] 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 operation 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.

[6] 周林, 黄勇, 郭珂, 等. 微电网储能技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 147-152.  
 ZHOU Lin, HUANG Yong, GUO Ke, et al. A survey of energy storage technology for micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 147-152.

[7] 吴雨, 潘文霞, 冯蒙霜, 等. 基于混合储能的微电网功率控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(2): 109-114.  
 WU Yu, PAN Wenxia, FENG Mengshuang, et al. Power control strategy for microgrid based on hybrid energy storage system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(2): 109-114.

[8] 桑丙玉, 陶以彬, 郑高, 等. 超级电容-蓄电池混合储能拓扑结构和控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 1-6.  
 SANG Bingyu, TAO Yibin, ZHENG Gao, et al. Research on topology and control strategy of the super-capacitor and battery hybrid energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 1-6.

[9] 张冰冰, 邱晓燕, 刘念, 等. 基于混合储能的光伏波动功率平抑方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(19): 103-109.  
 ZHANG Bingbing, QIU Xiaoyan, LIU Nian, et al. Research on the method for balancing fluctuant PV power based on hybrid energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(19): 103-109.

[10] 杨珺, 张建成, 周阳, 等. 针对独立风光发电中混合储

- 能容量优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 38-44.
- YANG Jun, ZHANG Jianchen, ZHOU Yang, et al. Research on capacity optimization of hybrid energy storage system in stand-alone wind/PV power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 38-44.
- [11] 张明锐, 林承鑫, 王少波, 等. 一种并网型风光互补发电系统的建模与仿真[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(1): 68-74.
- ZHANG Mingrui, LIN Chengxin, WANG Shaobo, et al. Modeling and simulation of grid-connected wind/PV hybrid generation system[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(1): 68-74.
- [12] 蒋宇, 高雪松. 双馈型变速恒频风力发电系统最大风能追踪控制研究[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 260-263.
- JIANG Yu, GAO Xuesong. Study on maximum wind energy tracing of doubly-fed VSCF wind-power generation system[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 260-263.
- [13] 钟沁宏, 阮毅, 赵梅花, 等. 变步长爬山法在双馈风力发电系统最大风能跟踪控制中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 67-73.
- ZHONG Qinong, RUAN Yi, ZHAO Meihua, et al. Application of variable-step hill climbing searching in maximum power point tracking for DFIG wind power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 67-73.
- [14] SHAO Mingyan, LIU Ruiye, LU Dianjun. Control strategy of voltage and frequency for islanded microgrid[C] // Power Electronics and Motion Control Conference, June 2-5, 2012, Harbin, China: 2085-2089.
- [15] 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.
- [16] 田慧雯, 李咸善, 陈铁, 等. 基于混合储能的光伏微网孤网运行的综合控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 122-128.
- TIAN Huiwen, LI Xianshan, CHEN Tie, et al. Comprehensive control strategy of hybrid energy storage-based photovoltaic island microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 122-128.
- [17] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 98-103.
- WANG Chengshan, XIAO Zhaoxia, WANG Shouxiang. Synthetical control and analysis of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 98-103.
- [18] ROCABERT J, LUNA A, BLAABJERG F, et al. Control of power converters in AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11): 4734-4749.
- [19] 王爱霞. 基于恒功率控制的并网模式下微源逆变器控制系统设计[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(3): 48-53.
- WANG Aixia. Design of micro-source inverter control system in grid-connected mode based on constant power system[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(3): 48-53.
- [20] 张玮, 武耀勇. 离网型风力发电和海水淡化联合技术配电方案[J]. 电力建设, 2014, 35(5): 79-83.
- ZHANG Wei, WU Yaoyong. Distribution scheme for off-grid wind-power and seawater desalination united technologies[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(5): 79-83.

---

收稿日期: 2014-09-20; 修回日期: 2015-04-23

作者简介:

付超 (1979-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用;

廖仰凯 (1989-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为微电网运行与控制; E-mail: 215004987@qq.com

樊世通 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微电网运行与控制。

(编辑 葛艳娜)