



# 含海水淡化系统的微电网分布式协调预测控制

马苗苗<sup>1,2\*</sup>, 于少远<sup>1</sup>, 潘军军<sup>1</sup>

1. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206

2. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206

\* 通信作者. E-mail: mmm@ncepu.edu.cn

收稿日期: 2018-06-20; 接受日期: 2018-07-10; 网络出版日期: 2018-10-26

中央高校基本科研业务费专项基金 (批准号: 2017ZZD004) 和北京市自然科学基金 (批准号: 4173079) 资助项目

**摘要** 本文针对海水淡化系统的负荷特性需求, 将微电网发电系统应用到海水淡化系统中, 并基于风力发电优先, 光伏发电配合, 必要时蓄电池补充的原则, 提出了一种微电网分布式协调预测控制策略. 对微电网中的风力发电电子系统和光伏发电电子系统, 分别设计分布式预测控制器, 协调各发电电子系统的输出功率. 考虑微电网中各子系统输出功率及其变化率约束, 分布式预测控制器优化其相应的目标函数, 使其输出总功率保证海水淡化系统的稳定运行. 仿真结果表明, 所提出的分布式协调预测控制方法既可以合理分配各子系统的发电功率, 满足海水淡化系统的负荷需求, 还可以限制各子系统输出功率的过大波动, 保护发电设备.

**关键词** 分布式预测控制, 微电网, 风力发电, 光伏发电, 海水淡化系统

## 1 引言

为保障沿海地区淡水供应与水资源的可持续利用, 海水淡化系统应运而生, 并且已成为淡水资源获取的有效方案之一<sup>[1,2]</sup>. 但是, 海水淡化系统是高耗能的工业生产系统, 目前多采用传统柴油机发电作为主要的供电方式, 生产成本低且存在污染. 随着化石能源的日益枯竭和新能源的开发利用, 以风能、太阳能等可再生能源为基础的微电网已经受到各界的广泛关注. 沿海地区的风能、太阳能等再生资源十分丰富, 因此, 将新能源微电网和高耗能的海水淡化系统相结合, 利用可再生能源发电来进行海水淡化, 既能解决淡水缺乏或供应不足的问题, 又能合理利用资源, 具有广阔的发展前景<sup>[3]</sup>.

目前, 利用风力发电<sup>[4]</sup>、太阳能发电<sup>[5,6]</sup>以及传统柴油机与风光储结合的混合微电网发电<sup>[7,8]</sup>与海水淡化系统相结合, 越来越受到学者的重视. 其中, 文献<sup>[9]</sup>提出一种和声搜索和混沌搜索相结合的新型优化算法, 根据海水淡化系统的负荷要求, 优化各发电系统的装机数量, 以获得最优的成本效益. 该优化方法基于大量的气象环境数据, 因此难以适应多变的自然条件. 文献<sup>[10]</sup>针对含传统柴油发电

**引用格式:** 马苗苗, 于少远, 潘军军. 含海水淡化系统的微电网分布式协调预测控制. 中国科学: 信息科学, 2018, 48: 1381-1394, doi: 10.1360/N112018-00071  
Ma M M, Yu S Y, Pan J J. Distributed coordinated predictive control for microgrids with seawater desalination system (in Chinese). Sci Sin Inform, 2018, 48: 1381-1394, doi: 10.1360/N112018-00071

与储能系统的微电网-海水淡化系统,采用V/f控制方法分配微电网输出功率,为海水淡化系统提供稳定的电压和频率支撑,在一定程度上降低了系统运行成本,但没有考虑海水淡化系统负荷的可控性.文献[11]利用非主导遗传算法(NSGA-II),对混合发电系统的非线性模型进行多目标优化,在考虑经济效益的同时协调各发电系统的输出功率.文献[12]针对含风柴储的海水淡化独立微电网系统,提出了基于超短期风速预测的实时能量管理调度策略,利用GA-BP遗传算法预测风速.在此基础上,文献[13]提出滚动时域电能管理方法,将微电网系统分为风储发电和风柴储发电两种工作模式,并通过当前风速的预测实现风能的充分利用.针对风光互补的微电网-海水淡化系统,文献[14]提出了一种简单的非线性预测控制方法,将带有混合整数优化的模型预测控制问题转化为连续变量下的非线性优化问题,来调节风力和光伏发电系统的输出电能,进而减少传统能源的消耗利用;在文献[15]中,作者采用监督预测控制的方法,在监督层运用模型预测控制,得到使目标函数最小化的参考值并将其输入到底层控制器,由底层控制器对风光互补系统及反渗透海水淡化系统进行控制.但文献[14,15]主要应用集中式控制来协调优化各个子系统,虽然在一定程度上考虑了各发电子系统间的相互影响,但随着控制系统维数和控制变量的增多,很明显采用集中式控制存在着在线计算量巨大、控制器设计复杂的缺陷,极大限制了该控制方法在微电网控制中的应用.而分散式控制在设计控制器时忽略了子系统间的关联性,对于微电网这种目标耦合较强的系统,采用完全分散的控制方式,势必会由于信息不足带来性能上的下降.

随着计算机网络的迅速发展,控制作为一种信息处理手段已不仅限于集中式控制和分散式控制,而是更多地为分布式控制所取代<sup>[16~18]</sup>.模型预测控制由于既能处理复杂的多目标函数又能处理对应的约束问题<sup>[19~21]</sup>,已被广泛应用于各种工业控制过程.本文将含有风能、太阳能的新能源微电网应用到海水淡化系统中,为海水淡化系统的稳定运行提供所需电能.由于微电网各子系统之间相互独立且有很强的非线性特性,另外,考虑到微电网中各子系统存在输出功率及其变化率约束,本文提出了一种分布式协调预测控制方法,分别对风力发电系统和光伏发电系统设计分布式预测控制器,在满足各发电子系统自身约束条件下,通过最小化对应的目标函数,协调分配各发电子系统的输出功率,使总输出功率满足海水淡化系统稳定运行时的功率需求.本文的创新点在于:(1)针对含海水淡化系统的微电网发电系统,提出分布式协调预测控制的方法,相比于已有文献的方法,本文提出的方法可独立控制各发电子系统,同时实现各发电子系统间信息的横向交互;(2)基于风力发电优先,光伏发电配合,必要时蓄电池补充的原则,设计分布式协调预测控制器,在考虑微电网经济调度的同时解决了功率平衡问题.

文章内容安排如下:第2节主要介绍微电网和海水淡化系统的模型;第3节分别对风力发电系统和光伏发电系统,设计分布式协调预测控制器;第4节给出了系统的仿真结果;第5节为本文结论.

## 2 含海水淡化系统的微电网建模

本节将微电网应用于海水淡化系统,利用风能、太阳能发电,产生的电能用以驱动高压水泵运转,使半透膜两侧产生渗透压差,从而过滤海水、产生淡水.整个系统的结构如图1所示.

### 2.1 海水淡化系统模型

目前,进行海水淡化的方法有很多,如蒸馏法、离子交换法、渗析法以及反渗透膜法等,反渗透淡

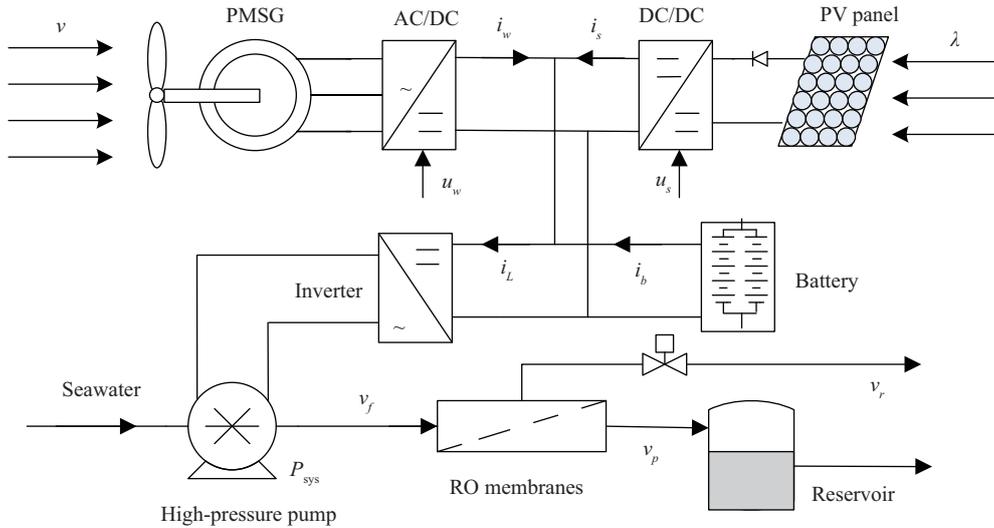


图 1 微电网 – 海水淡化系统结构图

Figure 1 The structure diagram of micro-grid and seawater desalination system

化法应用相对广泛,符合工业规模的生产应用要求,因此本文采用反渗透海水淡化法,其系统主要由高压泵、反渗透半透膜装置及储水箱组成,如图 1 所示.海水进入高压泵后,高压泵以高频速率驱动海水流动,从而形成较大的给水压力  $P_{sys}$ ,再经过反渗透半透膜装置,利用半透膜两侧的压差使海水中的盐分与淡水分离,得到高盐海水流和淡水流.海水淡化系统作为实际用电负荷,所需电能由微电网提供.

定义进入半透膜的海水流速为  $v_f$ ,半透膜滤出的高盐海水流速和淡水流速分别为  $v_r$  和  $v_p$ ,同时定义外界淡水消耗需求为  $F_d$ ,淡水储存需求为  $F_s$ ,总产出淡水流量为  $F_p$ ,根据质量守恒定律可得到如下方程:

$$v_f = v_r + v_p, \tag{1}$$

$$F_p = F_d + F_s. \tag{2}$$

假设水是不可压缩的流体,且密度被认为是恒定的.同时假设反渗透半透膜组件里的有效浓度对于海水浓度来说是一个加权平均数.半透膜过滤出的淡水流速  $v_p$  可以表示为

$$v_p = \frac{A_m K_m}{\rho_w A_p} (P_{sys} - \varepsilon), \tag{3}$$

其中  $A_m$  为半透膜的膜面积,  $K_m$  为半透膜整体的质量转化系数,  $P_{sys}$  为给水压力,  $A_p$  为管道横截面积,  $\rho_w$  为海水密度,  $\varepsilon$  为半透膜给水侧与淡水侧的渗透压差.

将式 (3) 代入式 (1) 中,我们可以得到系统给水压力  $P_{sys}$  的表达式为

$$P_{sys} = \frac{\rho_w A_p}{A_m K_m} (v_f - v_r) + \varepsilon, \tag{4}$$

其中,给水侧的渗透压  $\varepsilon$  与半透膜表面的平均有效浓度  $C_{eff}$  的表达式为

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \sigma C_{eff} (T + 273), \\ C_{eff} &= C_f \left( a + (1 - a) \left( 1 + \left( \frac{v_f}{v_r} - 1 \right) R \right) \right), \end{aligned}$$

其中  $C_f$  是给水侧的溶解性总固体 (TDS) 的总量,  $a$  为有效浓度的加权系数,  $\sigma$  是常数, 与渗透压和有效浓度有关,  $T$  为水的绝对温度,  $R$  为半透膜的脱盐率.

不考虑海水进入半透膜设备时的水位高度变化, 根据 Bernoulli 方程, 我们可以得到驱动海水淡化系统运转的功率  $P_{RO}$  的表达式为<sup>[22]</sup>

$$P_{RO} = \frac{1}{\eta} \left( P_{sys} \frac{F_p}{Y_{opt}} + \frac{1}{2} \frac{F_p^3}{Y_{opt}^3 A_p^2} \rho_w \right), \quad (5)$$

其中  $\eta$  为海水淡化系统的整体有效功率利用率 ( $0 < \eta < 1$ ). 海水淡化系统的最佳海水利用率  $Y_{opt}$  是在一个采样时间内, 半透膜过滤出淡水的流速  $v_p$  与海水流速  $v_f$  的比, 即  $Y_{opt} = v_p/v_f$ . 根据式 (1) 和 (2), 储水箱中的水位变化量  $\dot{h}$  可表示为

$$\dot{h} = \frac{F_s}{A_s} = \frac{A_p}{A_s} (v_f - v_r) - \frac{F_d}{A_s}, \quad (6)$$

其中  $A_s$  为海水淡化系统中储水箱的横截面积. 为使海水淡化系统满足外界用水的需求, 则应保证储水箱中的水位恒定, 即  $\dot{h} \equiv 0$ , 将式 (3), (4) 和 (6) 代入 (5), 即可得到维持系统稳定运行的功率需求量.

## 2.2 微电网发电系统模型

微电网中通常包括大量的分布式电源, 而单一的发电系统如风力发电或光伏发电的输出功率对气候环境有较强的依赖性. 因此, 本文采用风光储互补混合发电技术, 其中, 风力和光伏发电子系统作为供电主系统, 蓄电池储能子系统用来弥补电量不足时短暂的电能供应, 从而减少由单一电源造成的电力供应不足.

### 2.2.1 风力发电子系统

风力发电子系统包括风轮、多极永磁同步发电机 (PMSG) 和 AC/DC 变换器, 并通过直流母线与其他设备相连, 如图 1 所示. 风轮负责捕获风能, 并将风能转换为风轮旋转的机械能, 进而通过齿轮传动系统来驱动发动机产生电能. AC/DC 变换器通过调节 PMSG 终端电压进而间接控制风力发电机的输出功率. 在  $d-q$  旋转坐标系下, 定义  $i_d$  和  $i_q$  分别为  $d$  轴和  $q$  轴对应的定子电流, 电角速度为  $\omega_e$ , 风力发电子系统的模型可描述为<sup>[23]</sup>

$$\begin{aligned} \dot{x}_w &= \begin{bmatrix} \dot{i}_q \\ \dot{i}_d \\ \dot{\omega}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L} i_q - \omega_e i_d + \frac{\omega_e \phi_m}{L} \\ -\frac{R_s}{L} i_d + \omega_e i_q \\ \frac{P}{2J} (T_t - \frac{3}{2} \frac{P}{2} \phi_m i_q) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\pi v_b i_q}{3\sqrt{3}L\sqrt{i_q^2+i_d^2}} \\ -\frac{\pi v_b i_d}{3\sqrt{3}L\sqrt{i_q^2+i_d^2}} \\ 0 \end{bmatrix} u_w \\ &= f_w(x_w) + g_w(x_w)u_w, \end{aligned} \quad (7)$$

其中  $R_s$  和  $L$  分别为单相定子电阻和电感,  $J$  为叶轮的转动惯量,  $\phi_m$  为转子永磁体磁极的励磁磁链,  $v_b$  为直流母线上的电压,  $P$  为风机的极数,  $u_w$  为风机的控制信号 (AC/DC 变换器占空比),  $T_t$  为风轮叶片所产生的机械转矩, 且有

$$T_t = \frac{1}{2} C_t(\lambda) \rho A R v^2,$$

其中  $C_t(\lambda)$  为风力机的扭矩系数,  $\lambda$  为叶尖速比,  $\rho$  为空气密度,  $A$  为风力机叶片迎风扫掠面积,  $R$  为叶轮半径,  $v$  为风速.

根据式(7), 我们可以得到风力发电电子系统的输出电流为

$$i_w = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \sqrt{i_q^2 + i_d^2} u_w.$$

因此, 风力发电电子系统注入到直流母线的功率为

$$P_w = i_w v_b = \frac{\pi v_b}{2\sqrt{3}} \sqrt{i_q^2 + i_d^2} u_w. \quad (8)$$

风力发电电子系统的最大功率  $P_{w,\max}$  可以表示为风机捕获的机械动能与定子电阻的损耗功率  $P_R$  的差, 即

$$P_{w,\max} = T_t \frac{2\omega_e}{P} - P_R = K_{\text{opt}} \omega_e^3 - \frac{3}{2} (i_q^2 + i_d^2) R_s, \quad (9)$$

其中  $K_{\text{opt}} = 4C_t(\lambda_{\text{opt}})\rho AR^3/(P^3\lambda_{\text{opt}}^2)$ ,  $\lambda_{\text{opt}}$  为最佳叶尖速比.

### 2.2.2 光伏发电电子系统

光伏发电电子系统由光伏阵列和 DC/DC 变换器构成, 并通过直流母线连接到其他设备, 如图 1 所示. 类似于风力发电电子系统, DC/DC 变换器用于控制的光伏电池的输出功率. 定义光伏阵列的输出电压为  $v_{\text{pv}}$ , 注入直流母线的电流为  $i_s$ , 光伏发电电子系统的数学模型可表示为<sup>[23]</sup>

$$\begin{aligned} \dot{x}_s &= \begin{bmatrix} \dot{v}_{\text{pv}} \\ \dot{i}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{i_{\text{pv}}}{C} \\ -\frac{v_b}{L} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{i_s}{C} \\ \frac{v_{\text{pv}}}{L} \end{bmatrix} u_s \\ &= f_s(x_s) + g_s(x_s)u_s, \end{aligned} \quad (10)$$

其中  $C$  和  $L$  分别为 DC/DC 变换器的电容和电感,  $v_b$  为直流母线上的电压,  $u_s$  为控制信号 (DC/DC 变换器占空比),  $i_{\text{pv}}$  为光伏阵列的输出电流, 且有

$$i_{\text{pv}} = n_p I_{\text{ph}} - n_p I_{\text{rs}} \left( \exp \left( \frac{q(v_{\text{pv}} + i_{\text{pv}} R_s)}{n_s A_c K T} \right) - 1 \right),$$

其中  $I_{\text{ph}}$  和  $I_{\text{rs}}$  分别为参考光照强度下的光生电流和光伏电池的反向饱和电流,  $n_s$  和  $n_p$  为阵列中光伏电池的串、并联个数,  $R_s$  为光伏电池的等效串联电阻,  $A_c$  为光伏电池的 P-N 结偏置系数,  $K$  为 Boltzmann 常数,  $T$  为光伏电池的 P-N 结结温. 光伏发电电子系统注入直流母线的功率可以描述为

$$P_s = i_s v_b. \quad (11)$$

由光伏电池的特性可知, 光伏电子系统在最大输出功率点处满足

$$\frac{\partial P_{\text{pv}}}{\partial v_{\text{pv}}} = \frac{\partial (v_{\text{pv}} i_{\text{pv}})}{\partial v_{\text{pv}}} = i_{\text{pv}} + v_{\text{pv}} \frac{\partial i_{\text{pv}}}{\partial v_{\text{pv}}} = 0.$$

因此, 光伏发电电子系统的最大输出功率可近似描述为

$$P_{s,\max} = i_{\text{pv},\max} v_b = -\frac{\partial i_{\text{pv}}}{\partial v_{\text{pv}}} v_{\text{pv}}^2 = -\frac{\Delta i_{\text{pv}}}{\Delta v_{\text{pv}}} v_{\text{pv}}^2. \quad (12)$$

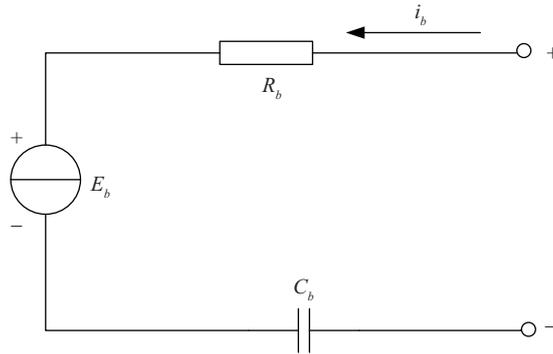


图 2 蓄电池等效电路图

Figure 2 The equivalent circuit diagram of battery

### 2.2.3 蓄电池储能子系统

在独立运行的风光互补发电系统当中, 储能装置主要是蓄电池. 在风力、光照充足时, 系统发电量能够满足外界负载, 此时蓄电池进行充电, 将多余电能进行储存; 在风力、光照不足时, 系统无法满足外界负荷需求, 蓄电池进行放电, 提供给负载电能, 以便提高供电品质. 我们可以将其简化为一个电压源  $E_b$  串联一个电阻  $R_b$  和一个电容  $C_b$ , 如图 2 所示.

由图 2 可知, 蓄电池的输出电压和输出电流分别为

$$v_b = E_b + v_c + i_b R_b,$$

$$i_b = i_w + i_s - i_L = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \sqrt{i_q^2 + i_d^2} u_w + i_s - i_L,$$

其中  $v_c$  为电容  $C_b$  的电压,  $i_L$  为负载电流. 蓄电池两端的电压可以写成

$$v_b = E_b + v_c + \left( \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \sqrt{i_q^2 + i_d^2} u_w + i_s - i_L \right) R_b. \quad (13)$$

因此, 蓄电池的数学模型可描述为<sup>[24]</sup>

$$\dot{x}_c = \dot{v}_c = \frac{i_b}{C_b} = \frac{1}{C_b} \left( \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \sqrt{i_q^2 + i_d^2} u_w + i_s - i_L \right)$$

$$= f_c(x_w, x_s, x_c). \quad (14)$$

## 3 分布式协调预测控制器设计

由于风能与太阳能均为分布式能源, 各子系统的结构相对独立, 物理约束多且复杂, 同时间歇性和随机性明显, 故采用分布式协调预测控制分别独立地对两个子系统进行控制器设计, 分布式协调预测控制器负责根据外界的自然条件 (变化的风速、光照、温度及负荷), 实时分配各发电子系统的发电功率, 同时实现了两个子系统间信息的横向交互.

基于风力发电优先, 光伏发电配合, 必要时蓄电池补充的原则, 微电网发电系统可分为以下 3 种工作模式.

模式一: 风力发电系统的输出功率满足并跟踪外界负载的需求功率. 当外界风能充足, 风力发电子系统可以满足外界负载需求时, 光伏发电子系统及蓄电池储能系统都处于停机状态. 直到风力发电子系统不能满足外界负载需求时, 系统切换到第 2 种工作模式.

模式二: 风力发电子系统处于最大功率点发电, 光伏发电子系统配合发电, 跟踪外界负载需求. 当外界风能不足, 风力发电子系统即使以最大功率发电仍不能满足外界负载需求时, 光伏发电系统启动, 作为辅助发电系统向外界负载供电. 此时蓄电池储能系统仍然处于停机状态. 当外界负载需求超过混合发电系统的最大功率时, 系统切换到第3种工作模式.

模式三: 风力发电子系统与光伏发电子系统均以最大功率发电, 蓄电池储能系统开机, 作为应急系统供应电能. 当外界风能、太阳能均不足, 风力发电子系统与光伏发电子系统均以最大功率发电仍无法满足外界负载需求时, 启动蓄电池储能系统开始放电, 以补充系统所需剩余功率.

根据以上原则, 我们定义目标函数如下:

$$L(x, P_w, P_s) = \alpha(P_{RO} - P_w - P_s)^2 + \beta P_s^2 + \gamma \Delta P_b^2,$$

其中  $\alpha, \beta, \gamma$  为各项的权重因子,  $\Delta P_b$  表示蓄电池电量的变化量. 上式中,  $\alpha(P_{RO} - P_w - P_s)^2$  表示风力发电子和光伏发电子系统的输出功率与负荷需求的偏差, 故权重因子  $\alpha$  可以选择相对较大的值, 以保证风光互补发电系统的输出功率尽可能满足外界负荷需求. 若要使上式第一项的差值最小,  $P_w$  和  $P_s$  有无数种满足条件的组合解. 为保证结果唯一, 同时从经济性能角度考虑, 加入  $\beta P_s^2$  来表示对光伏发电子系统输出功率的惩罚. 为使风力发电子系统处于优先发电状态, 光伏发电子系统在风力发电量不足的情况下配合发电, 权重因子  $\beta$  的值应相对较小.  $\gamma \Delta P_b^2$  则用于抑制蓄电池电量的起伏, 避免因频繁充放电或电流过大而损坏蓄电池.

由于风能和太阳能本身的随机性, 加之外界气象环境的影响, 微电网各子系统的实际输出功率和输出功率变化率容易发生较大波动, 从而导致输出功率频繁变化, 引起系统电流突变, 影响设备的使用寿命. 因此为保护发电设备, 本文增加了对风力发电子系统及光伏发电子系统输出功率及其变化率的约束. 微电网输出功率及其变化率的约束可以描述为

$$0 \leq P_w(\tau) \leq \min_{\tau} \{P_{w,\max}(\tau)\}, \tau \in [j\Delta, (j+1)\Delta], \quad (15)$$

$$P_w((j+1)\Delta) - P_w(j\Delta) \leq dP_{w,\max}, \quad (16)$$

$$P_{w,\max}(\tau) = P_{w,\max}(\tilde{x}_w(\tau)), \quad (17)$$

$$0 \leq P_s(\tau) \leq \min_{\tau} \{P_{s,\max}(\tau)\}, \tau \in [j\Delta, (j+1)\Delta], \quad (18)$$

$$P_s((j+1)\Delta) - P_s(j\Delta) \leq dP_{s,\max}, \quad (19)$$

$$P_{s,\max}(\tau) = P_{s,\max}(\tilde{x}_s(\tau)), \quad (20)$$

其中  $j = 0, 1, 2, \dots, N-1$  ( $N = T_p/\Delta$ ),  $T_p$  为预测时域,  $\Delta$  为采样时间,  $dP_{w,\max}, dP_{s,\max}$  为在一个采样间隔内, 风力发电子和光伏发电子系统输出的最大允许变化量. 式 (15) 和 (18) 保证了各子系统的给定功率小于在此采样间隔内各子系统所能发出的最大功率的最小值, 使各子系统实际输出功率有所限制以保护发电设备; 式 (16) 和 (19) 约束了各子系统的给定功率在一个采样周期内的增幅, 避免风力发电子系统与光伏发电子系统短期间变化量过大而造成系统损坏; 式 (17) 和 (20) 表示风力发电子和光伏发电子系统最大可用功率与系统状态之间的关系.

在分布式协调预测控制器的寻优过程中, 为了得到未来时刻的各个子系统的最大可用功率, 我们假设每个采样时间内的风速、光照和温度是恒定的, 只要采样时间和预测时域都足够短, 那么由阵风引起的高频率扰动可以被合理的忽略. 根据模型预测控制理论, 风力发电子系统分布式预测控制器可设计为

$$\min_{u_w} \int_t^{t+T_p} L(\tilde{x}(\tau), P_w(\tau), P_s(\tau)) d\tau \quad (21)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \dot{\tilde{x}}_w(\tau) = f_w(\tilde{x}_w(\tau)) + g_w(\tilde{x}_w(\tau))u_w(\tau), \\ 0 \leq P_w(\tau) \leq \min_{\tau} \{P_{w,\max}(\tau)\}, \tau \in [j\Delta, (j+1)\Delta), \\ P_w((j+1)\Delta) - P_w(j\Delta) \leq dP_{w,\max}, \\ P_{w,\max}(\tau) = P_{w,\max}(\tilde{x}_w(\tau)), \end{cases}$$

光伏发电子系统的分布式预测控制器可设计为

$$\min_{u_s} \int_t^{t+T_p} L(\tilde{x}(\tau), P_w(\tau), P_s(\tau))d\tau \quad (22)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \dot{\tilde{x}}_s(\tau) = f_s(\tilde{x}_s(\tau)) + g_s(\tilde{x}_s(\tau))u_s(\tau), \\ \dot{\tilde{x}}_c(\tau) = f_c(\tilde{x}_w(\tau), \tilde{x}_s(\tau), \tilde{x}_c(\tau)), \\ 0 \leq P_s(\tau) \leq \min_{\tau} \{P_{s,\max}(\tau)\}, \tau \in [j\Delta, (j+1)\Delta), \\ P_s((j+1)\Delta) - P_s(j\Delta) \leq dP_{s,\max} \\ P_{s,\max}(\tau) = P_{s,\max}(\tilde{x}_s(\tau)), \end{cases}$$

其中  $\tilde{x}_w, \tilde{x}_s, \tilde{x}_c$  分别为未来时刻微电网各子系统的预测状态量. 采用 MATLAB 优化工具箱中的 fmincon 程序求解上述优化问题 (21) 和 (22), 在一个采样周期内, 定义  $x_w(t_k), x_s(t_k), v_c(t_k)$  为微电网在  $t_k$  时刻的状态量, 分布式协调预测控制器的具体实现步骤可表述如下:

步骤 1. 对分布式预测控制器进行初始化. 令  $t = 0$ , 根据初始条件解优化控制问题 (21) 和 (22), 得到相应的最优解  $u_w^*(0), u_s^*(0)$ , 并预测未来时刻状态.

步骤 2. 在  $t_k$  时刻, 风力发电子系统 and 光伏发电子系统信息交互, 分别传递其对应的预测状态量  $\tilde{x}_w(\tau; x_w(t_{k-1}); t_{k-1})$  和  $\tilde{x}_s(\tau; x_s(t_{k-1}); t_{k-1}), \tau \in [t_k, t_{k-1} + T_p]$ .

步骤 3. 求解优化控制问题 (21) 和 (22).

步骤 4. 如果优化控制问题 (21) 和 (22) 有可行解, 则令  $u_w(t_k) = u_w^*(t_k), u_s(t_k) = u_s^*(t_k)$ , 否则,  $u_w(t_k) = u_w^*(t_{k-1}), u_s(t_k) = u_s^*(t_{k-1})$ .

步骤 5. 预测未来时刻的状态量  $\tilde{x}_w(\tau; x_w(t_k); t_k)$  和  $\tilde{x}_s(\tau; x_s(t_k); t_k), \tau \in [t_{k+1}, t_k + T_p]$ .

步骤 6. 将控制量  $u_w(t_k), u_s(t_k)$  作用于系统, 令  $k = k + 1$ , 在下一采样时刻返回步骤 2.

## 4 仿真结果与分析

本节利用前面设计的分布式预测控制器对含海水淡化系统的微电网进行仿真研究. 为保证系统有较好的闭环控制性能且控制器在线计算负担不宜过大, 取预测时域为  $T_p = 3$  s, 控制时域  $T_c = 3$  s, 采样时间  $\Delta = 1$  s, 权重因子  $\alpha = 1, \beta = 0.01, \gamma = 0.4$ . 微电网 - 海水淡化系统的主要参数如表 1 所示.

### 4.1 理想自然环境下的仿真分析

假设系统处于实时变化的理想环境条件中, 风速、外界温度及光照强度及淡水消耗需求均为随机变化的函数, 仿真时间为 180 s. 图 3 表示外界自然环境的变化和相应时间下的淡水消耗需求, 其中, 图 3(a) 表示外界风速的变化情况, 图 3(b) 表示温度的变化情况, 图 3(c) 表示光照强度的变化情况, 图 3(d) 表示淡水消耗需求.

表 1 微电网 – 海水淡化系统的主要参数

Table 1 The key parameters of micro-grid and seawater desalination system

Parameter	Value	Parameter	Value
Fluid density ( $\rho_w$ )	1007 kg/m <sup>3</sup>	Number of PV cells ( $n_s, n_p$ )	(200, 5)
Pipe cross-sectional area ( $A_p$ )	1.27E-4 m <sup>3</sup>	Reverse saturation current ( $I_{rs}$ )	3.27 A
Membrane area ( $A_s$ )	15.6 m <sup>3</sup>	Deviation of P-N junction ( $A$ )	1.6
Overall power efficiency ( $\eta$ )	0.9	Temperature of P-N junction ( $T$ )	301.18 K
PMSG number of poles ( $P$ )	28	Converter capacitance ( $C$ )	1000 $\mu$ F
Turbine radius ( $R$ )	1.84	Converter inductance ( $L$ )	4 mH
Stator windings resistance ( $R_s$ )	0.3676 $\Omega$	Battery equivalent resistance ( $R_b$ )	14 m $\Omega$
Stator windings inductance ( $L$ )	3.55 mH	Battery equivalent capacitance ( $C_b$ )	1.8E+5 F
Stator windings flux ( $\phi_m$ )	0.2867 Wb	Battery equivalent voltage ( $E_b$ )	48 V
Rotational inertia ( $J$ )	7.856 kgm <sup>2</sup>		

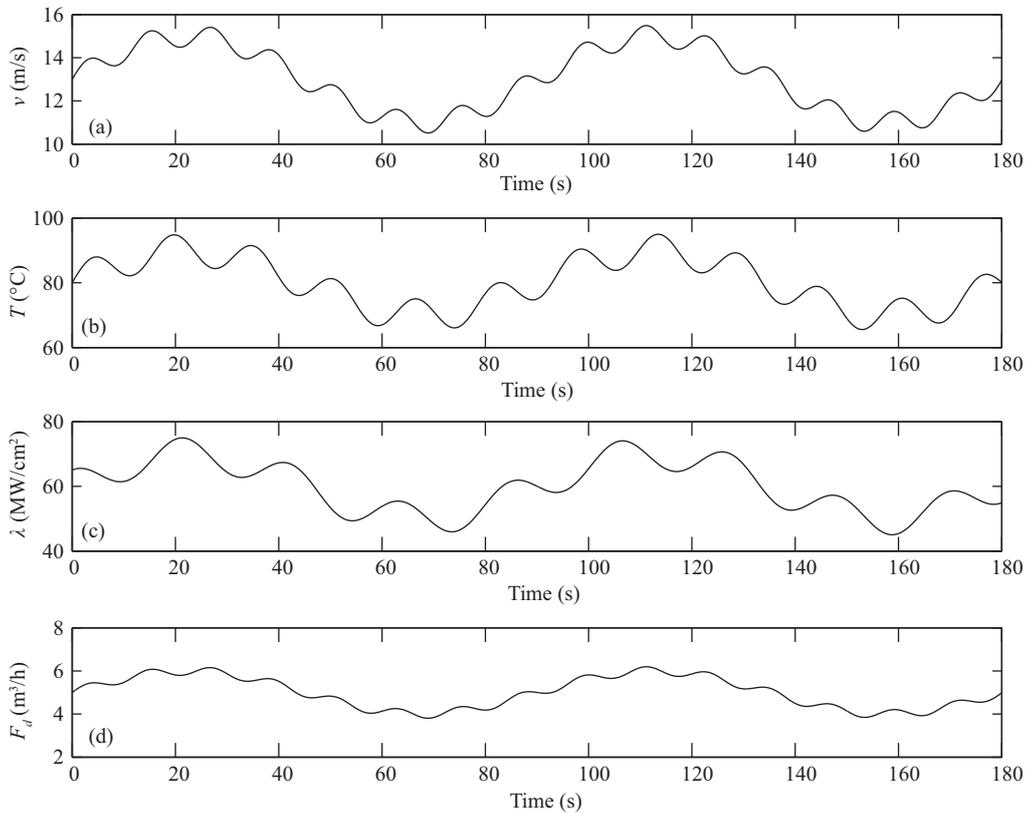


图 3 理想环境条件和淡水消耗需求

Figure 3 The ideal environment conditions and the freshwater demand. (a) Wind speed; (b) temperature; (c) illumination; (d) freshwater demand

图 4 为微电网发电系统在理想的自然条件下跟踪海水淡化系统功率需求的情况. 图 4(a) 中实线为微电网发电系统中风力发电子系统的实际输出功率, 图 4(b) 中实线为光伏发电子系统实际输出功率. 图 4(c) 中实线表示海水淡化系统总需求功率, 虚线为风力发电子系统和光伏发电子系统实际输出

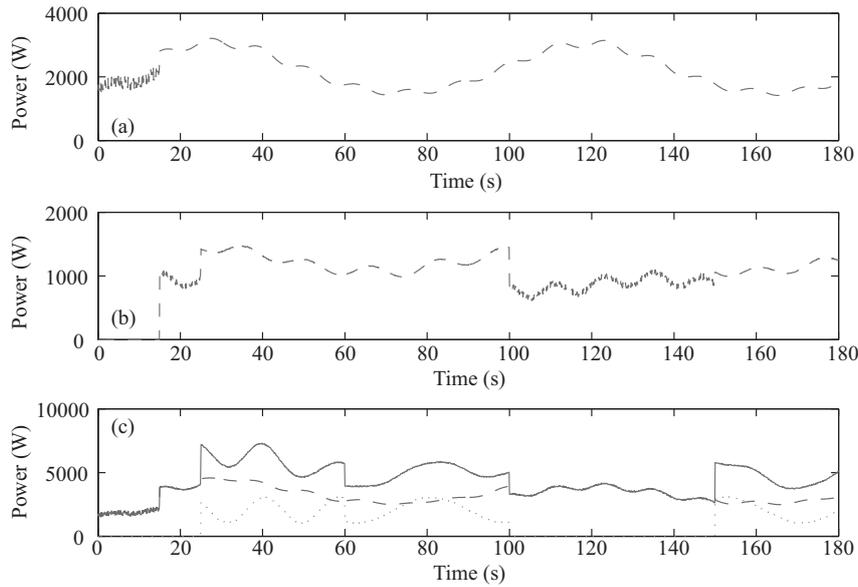


图 4 理想环境下微电网各发电子系统的输出功率

**Figure 4** The output power of micro-grid power generation subsystem under ideal environment. (a) Output power of wind generation subsystem; (b) output power of photovoltaic generation subsystem; (c) output power of wind and photovoltaic generation subsystem (solid line), total power demand (dash line) and output power of battery (dotted line)

功率, 点线为蓄电池输出功率. 从图 4(a) 和 (b) 中可以看到, 在 0~15 s 风力发电子系统能提供足够电量, 满足负荷需要, 此时光伏系统和蓄电池均处于关闭状态. 从 15 s 开始, 系统所需功率增加, 分布式协调预测控制器分配各子系统发电量, 使风力发电子系统以最大功率发电, 同时光伏发电子系统开始工作, 以保证海水淡化系统的稳定运行. 图 4(c) 中, 海水淡化系统在 25~100 s 和 150~180 s 时, 所需功率巨大, 即使风力和光伏系统以最大功率发电依然达不到驱动海水淡化系统运行所需功率, 此时蓄电池系统启动以弥补短时有用电缺口, 驱动海水淡化系统运行, 保证淡水充足. 各发电子系统相互协调, 使整个微电网发电系统很好的满足了海水淡化系统的功率需求.

#### 4.2 恶劣环境下的仿真分析

在实际环境中, 通常会遇到一些极端的气象环境, 对风速、光照强度及温度产生强烈的影响, 同时, 复杂的工业生产活动也会造成淡水消耗需求大幅波动, 进而引起海水淡化系统所需用电量的大幅波动. 出于系统实际应用考虑, 本文选择 Gauss 白噪声信号来模拟恶劣条件下的高频干扰. 仿真给出了在实时变化的恶劣条件下, 分布式协调预测控制器的控制效果, 仿真时间为 180 s. 图 5 为外界自然环境的变化情况和相应时间下的淡水消耗需求量. 其中, 图 5(a) 表示外界风速的变化情况, 图 5(b) 表示光照强度的变化情况, 图 5(c) 表示温度的变化情况, 图 5(d) 表示淡水消耗需求.

图 6 表示微电网发电系统在极端的自然条件下跟踪外界负荷需求的情况. 图 6(a) 表示微电网发电系统中风力发电子系统的实际输出功率, 图 6(b) 表示光伏发电子系统在对应风速下的实际输出功率. 图 6(c) 中, 实线表示在相应气象、淡水需求条件下, 海水淡化系统总需求功率, 虚线表示微电网发电系统在对应条件下的实际输出功率, 点线为蓄电池的输出功率. 从图 6 可以看出, 系统即便在外界自然条件及淡水需求用量都出现高频扰动的情况下, 微电网发电系统的输出功率仍能很好地跟踪海水淡化系统的功率需求, 且曲线的走势也与先前曲线大致相似, 这充分显示了分布式预测控制器很好的

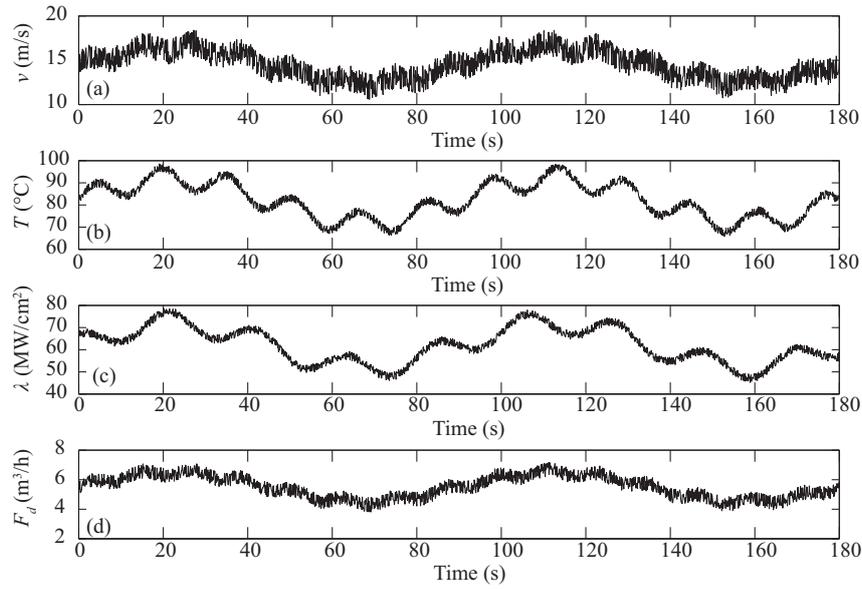


图 5 恶劣环境条件和淡水消耗需求

Figure 5 The terrible environment conditions and the freshwater demand. (a) Wind speed; (b) temperature; (c) illumination; (d) freshwater demand

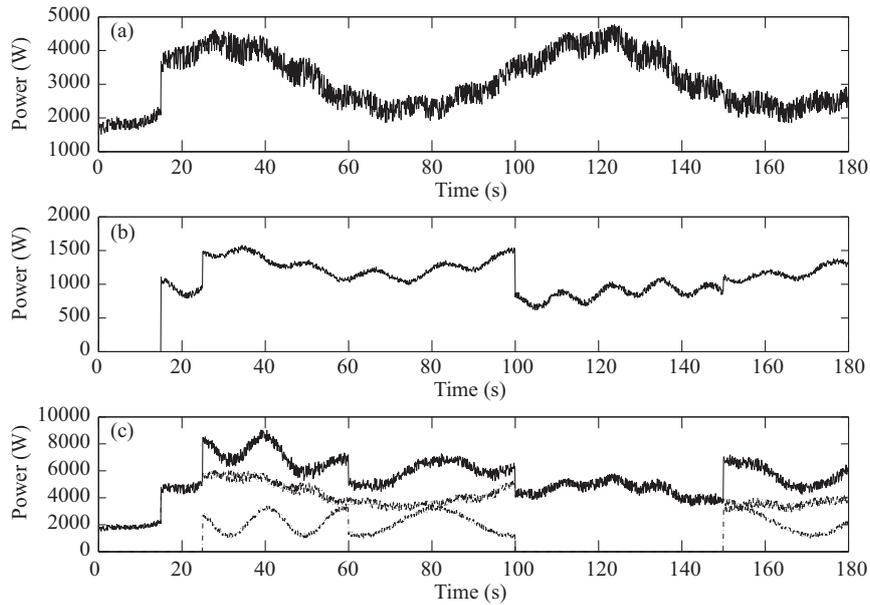


图 6 恶劣环境下微电网各发电子系统的输出功率

Figure 6 The output power of micro-grid power generation subsystem under terrible environment. (a) Output power of wind generation subsystem; (b) output power of photovoltaic generation subsystem; (c) output power of wind and photovoltaic generation subsystem (solid line), total power demand (dash line) and output power of battery (dotted line)

鲁棒性. 虽然各子系统的最大可发功率也随气象条件强烈波动, 但分布式协调预测控制方法还是能很好地满足负载需求.

## 5 结语

本文将风能、太阳能为基础的新能源微电网应用到海水淡化系统中, 为其提供稳定运行所需的电能. 由于各子系统之间相互独立且有很强的非线性特性, 另外, 考虑到微电网中各子系统存在输出功率及其变化率约束, 本文提出了一种分布式协调预测控制的方法, 根据风力发电优先, 光伏发电配合, 必要时蓄电池补充的原则, 分别对风力发电电子系统和光伏发电电子系统设计分布式协调预测控制器. 控制器根据海水淡化系统的负荷特性需求, 最小化相应的目标函数, 协调分配各发电电子系统的输出功率. 仿真结果表明了所提出的分布式协调预测控制方法可以合理分配微电网各子系统的发电功率, 既可以满足海水淡化系统的负荷需求, 还可以限制各子系统输出功率的过大波动, 保护发电设备.

## 参考文献

- 1 Siddaiah R, Saini R P. A review on planning, configurations, modeling and optimization techniques of hybrid renewable energy systems for off grid applications. *Renew Sustain Energy Rev*, 2016, 58: 376–396
- 2 Parida A, Chatterjee D. An improved control scheme for grid connected doubly fed induction generator considering wind-solar hybrid system. *Int J Electr Power Energy Syst*, 2016, 77: 112–122
- 3 Karavas C S, Arvanitis K G, Kyriakarakos G, et al. A novel autonomous PV powered desalination system based on a DC microgrid concept incorporating short-term energy storage. *Sol Energy*, 2018, 159: 947–961
- 4 Carta J A, González J, Cabrera P, et al. Preliminary experimental analysis of a small-scale prototype SWRO desalination plant, designed for continuous adjustment of its energy consumption to the widely varying power generated by a stand-alone wind turbine. *Appl Energy*, 2015, 137: 222–239
- 5 Astolfi M, Mazzola S, Silva P, et al. A synergic integration of desalination and solar energy systems in stand-alone microgrids. *Desalination*, 2017, 419: 169–180
- 6 Kyriakarakos G, Dounis A I, Arvanitis K G, et al. Design of a fuzzy cognitive maps variable-load energy management system for autonomous PV-reverse osmosis desalination systems: a simulation survey. *Appl Energy*, 2017, 187: 575–584
- 7 Zhang X Y, Huang K, Wang Y, et al. Operation and control of isolated microgrid with wind turbines and seawater desalination equipment. In: *Proceedings of International Conference on Electrical Machines and Systems*, Pattary, 2015. 427–431
- 8 Maleki A, Pourfayaz F, Ahmadi M H. Design of a cost-effective wind/photovoltaic/hydrogen energy system for supplying a desalination unit by a heuristic approach. *Sol Energy*, 2016, 139: 666–675
- 9 Maleki A, Khajeh M G, Rosen M A. Weather forecasting for optimization of a hybrid solar-wind-powered reverse osmosis water desalination system using a novel optimizer approach. *Energy*, 2016, 114: 1120–1134
- 10 Zhao B, Zhang X S, Li P, et al. Optimal design and application of energy storage system in dongfushan island stand-alone microgrid. *Automat Elect Power Syst*, 2013, 37: 161–167 [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. *电力系统自动化*, 2013, 37: 161–167]
- 11 Tang Q F, Liu N, Zhang J H. Optimal operation method for microgrid with wind/PV/diesel generator/battery and desalination. *J Appl Math*, 2014, 26: 5286–5287
- 12 Guo L, Wang W, Liu W J, et al. The energy management method for stand-alone wind/diesel/battery/sea-water desalination microgrid. *Trans China Electr Soc*, 2014, 29: 113–121 [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. *电工技术学报*, 2014, 29: 113–121]
- 13 Guo L, Liu W, Li X, et al. Energy management system for stand-alone wind-powered-desalination microgrid. *IEEE Trans Smart Grid*, 2016, 7: 1019–1087
- 14 Salazar J, Tadeo F, Prada C D. Predictive control of microgrids with mixed sources for desalination in remote areas. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, 49: 244–249
- 15 Qi W, Liu J F, Christofides P D. Supervisory predictive control for long-term scheduling of an integrated wind/solar energy generation and water desalination system. *IEEE Trans Contr Syst Technol*, 2012, 20: 504–512
- 16 Moayedi S, Davoudi A. Unifying distributed dynamic optimization and control of islanded DC microgrids. *IEEE Trans Power Electron*, 2017, 32: 2329–2346

- 17 Khan M R B, Jidin R, Pasupuleti J. Multi-agent based distributed control architecture for microgrid energy management and optimization. *Energy Convers Manage*, 2016, 112: 288–307
- 18 Hamad A A, El-Saadany E F. Multi-agent supervisory control for optimal economic dispatch in DC microgrids. *Sustain Cities Soc*, 2016, 27: 129–136
- 19 Zou Y Y, Lam J, Niu Y G, et al. Constrained predictive control synthesis for quantized systems with Markovian data loss. *Automatica*, 2015, 55: 217–225
- 20 He D F, Wang L, Sun J. On stability of multiobjective NMPC with objective prioritization. *Automatica*, 2015, 57: 189–198
- 21 Zou Y Y, Su X, Niu Y G. Event-triggered distributed predictive control for the cooperation of multi-agent systems. *IET Control Theory Appl*, 2016, 11: 10–16
- 22 Wen Y T, Dai Y X, Zhou X W, et al. Application of island microgrid based on hybrid batteries storage. In: *Proceedings of International Conference on Renewable Energy Research and Application*, Milwaukee, 2015. 262–267
- 23 Valenciaga F, Puleston P F. Supervisor control for a stand-alone hybrid generation system using wind and photovoltaic energy. *IEEE Trans Energy Convers*, 2005, 20: 398–405
- 24 Fuller M E. A battery model for constant-power discharge including rate effects. *Energy Convers Manage*, 2014, 88: 199–205

## Distributed coordinated predictive control for microgrids with seawater desalination system

Miaomiao MA<sup>1,2\*</sup>, Shaoyuan YU<sup>1</sup> & Junjun PAN<sup>1</sup>

1. *School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;*
2. *State Key Laboratory of Alternate Electric Power System With Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China*

\* Corresponding author. E-mail: mamm@ncepu.edu.cn

**Abstract** Microgrid power generation systems are applied in seawater desalination systems in accordance with the load demand characteristics of seawater desalination systems. This study aims to propose a distributed coordinated predictive control scheme based on the principle that the wind power subsystem is operated as a primary system, the photovoltaic subsystem is considered as an auxiliary system, and the battery is activated only when the wind and photovoltaic subsystem cannot satisfy the power demand. Distributed coordinated predictive controllers were separately designed for wind power and photovoltaic power generation subsystems in the microgrid to coordinate the output power of each power generation subsystem. The distributed predictive controller optimized the corresponding cost function by considering the constraints of the microgrid output power and its change rate to ensure that the power demand of the seawater desalination system was satisfied. Simulation results showed that under various environmental conditions, the proposed distributed coordinated predictive control method allocated the output power of each generation subsystem rationally. This behavior satisfied the power demand of the seawater desalination system and limited the excessive fluctuation of output power to protect power generation equipment.

**Keywords** distributed predictive control, microgrid, wind power generation, photovoltaic power generation, seawater desalination system



**Miaomiao MA** was born in 1982. She received her B.S. degree in automation from Jilin University, China, in 2003. She received her M.S. and Ph.D. degrees in control theory and control engineering from Jilin University, China in 2006 and 2009, respectively. From 2012 to 2013, she was a visiting scholar at the Institute for Systems Theory and Automatic Control at the University of Stuttgart, Stuttgart, Germany. She is currently an associate professor at the

North China Electric Power University. Her research interests include model predictive control, optimal and robust control, and applications in power system.



**Shaoyuan YU** was born in 1994. In 2016, he received his B.S. degree in automation from Yantai University, China. Currently, he is pursuing his M.D. degree at the School of Control and Computer Engineering at North China Electric Power University. His research interests include model predictive and optimal control and power system applications.



**Junjun PAN** was born in 1992. He received his B.S. degree in automation from Nanyang Normal University, China, in 2015. Currently, he is pursuing his M.D. degree at the School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University. His research interests include model predictive and optimal control and power system applications.