

文章编号:0254-0096(2016)02-0329-08

离网型风电反渗透海水淡化系统精细化设计

李超, 周喆, 李利平

(中国电力工程顾问集团有限公司, 北京 100120)

摘要: 为进一步降低海水淡化的成本,同时提高资源利用效率,提出一个精细的离网型风电海水淡化系统动态优化设计模型。该优化设计模型以风电、储能设备和海水淡化装置的物理模型为基础,通过求解数学规划问题,可得到系统各部分的最优容量配置和实时运行方式。该模型最大的特点是考虑了风能的波动性,在风能动态变化的前提下,得到的优化设计结果比静态的设计更具现实意义。

关键词: 风电; 海水淡化; 反渗透; 系统设计; 离网型

中图分类号: TM614; P747.6 **文献标识码:** A

0 引言

中国是世界上严重缺水的国家之一。《全国海洋经济发展“十二五”规划》^[1]鼓励沿海城市与企业以海水淡化水作为生产生活用水。《海水淡化产业发展“十二五”规划》提出应通过可再生能源改善海水淡化的能源供应问题^[2]。沿海地区和海岛的风资源十分丰富^[3],风能与反渗透相结合将提高能源利用效率,并解决供水问题^[4,5]。因此,风电反渗透海水淡化研究具有明显的经济效益和社会效益。目前,部分学者对风电海水淡化进行了研究,提出了一些很有价值的建议。文献[6]提出非并网风电和海水淡化相结合的概念,在一定程度上解决了风电的消纳问题,但当风电不足时,需要电网补充供电,未解决风电波动对电网的冲击问题。文献[7]给出了海岛风能海水淡化组合方式,但假设过多,未考虑风资源和海水淡化系统的运行情况,应用范围有限。

本文提出一种针对离网型风电的反渗透海水淡化系统设计方法。该方法采用离网型风电作为供电电源,配置一定容量的储能设备作为补充,建立更精确的海水淡化系统模型,在满足产水量、产水品质和膜组件安全的前提下,构造出以风力机、储能设备和海水淡化设备的综合投资及运行成本最小为目标的目标函数。根据全年风能波动情况,

通过求解数学规划问题,得出系统配置和运行方案。

1 风资源分析

风资源的有效利用是解决化石能源污染问题的有效途径。由于风电具有间歇性、随机性和反调峰的特点,无法灵活调度控制,影响了电网的安全性和稳定性^[8,9]。鉴于此,本文采用离网型风电作为电源,系统供电网络不与电网连接,因而不受电网接纳能力的限制。但海水淡化系统需根据风电波动范围变负荷运行,这对系统设计及运行提出了更高的要求。

1.1 系统规模

风电海水淡化系统规模应按“以电定水”的方式确定。本文根据风电场发电量确定海水淡化系统规模。

1.2 风速与发电量的关系

根据风资源和拟采用的风力机性能可得出有效发电量。以东海大桥的风资源数据为例^[10],如图1所示。从图1可看出,风速随时间不断变化,6~8月份平均风速较高,1、2、12月份风资源相比于其他月份较少,3、4、5、9、10月份的风速波动较大,有明显的波峰波谷。系统供电量波动将引起反渗透系统驱动压力变化,导致系统能耗上升和产水品质

收稿日期: 2014-01-22

通信作者: 李超(1984—),男,博士、高级工程师,主要从事新能源、系统优化方面的研究。chaoli@cepec.net

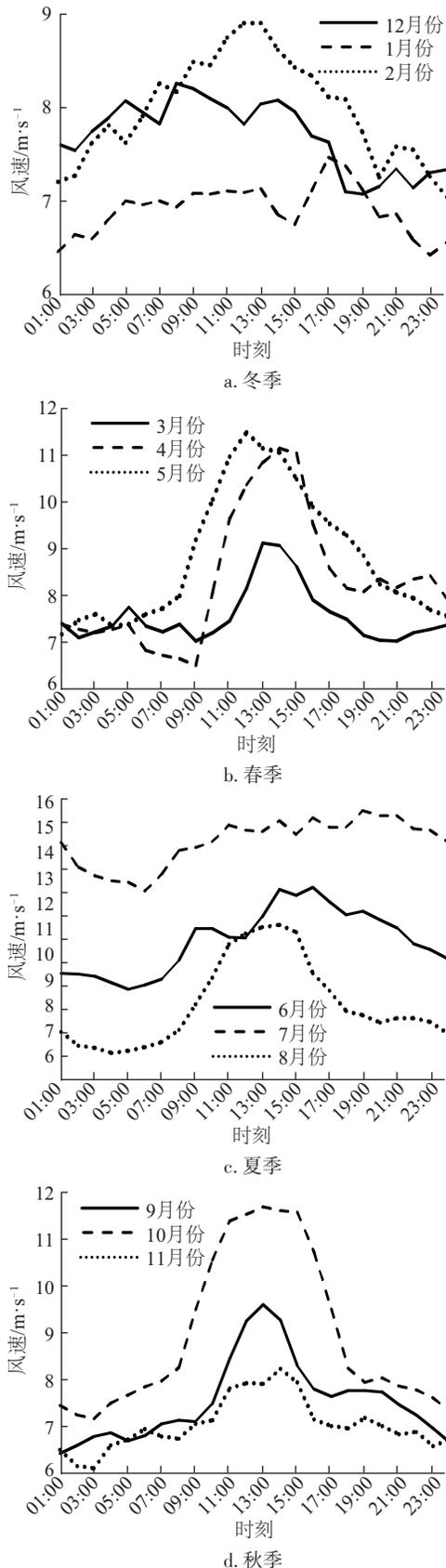


图1 东海大桥全年风速图
Fig. 1 Annual wind speed

下降,甚至损坏设备。为了使反渗透海水淡化系统保持在最佳工况运行,本文采用弃风、储能设备充放电和海水淡化系统变负荷运行的方式适应系统供电量的波动。

2 储能设备

通过储能设备充放电切换,确保了电源输出稳定和负载运行安全。储能设备包括抽水蓄能、飞轮储能、铅酸电池等多种类型。这些设备的投资成本、运行费用、最大容量等性质各不相同^[11]。本文采用铅酸蓄电池作为系统储能设备。

储能设备是风电海水淡化系统的重要部件。储能设备容量过小则无法充分利用风能;容量过大,虽然提高了风能利用率,但系统投资过高,经济性降低。因此,应通过系统综合优化,根据风电波动和系统产水情况,确定储能设备最佳容量。

3 反渗透海水淡化系统

反渗透海水淡化系统由预处理设备、反渗透膜组件和能量回收装置等组成,如图2所示。其中,反渗透膜组是海水淡化系统的核心部件,由装设多支反渗透膜元件的压力容器排列组合而成。

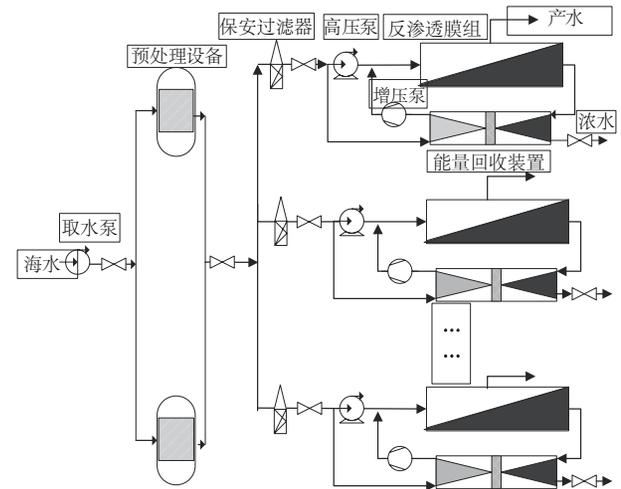


图2 反渗透海水淡化系统结构图
Fig. 2 Structure of seawater reverse osmosis system

3.1 反渗透系统建模

反渗透海水淡化模型如式(1)~式(8)所示^[12]。高压侧平均压力为本支膜给水压力和下一支膜给水压力的平均值,如式(1)所示。给水渗透压与给水浓度和温度相关,如式(2)所示。产水流量由纯

水透过性常数、膜面积、高压侧平均压力、产水侧压力和给水渗透压确定,如式(3)所示。产水浓度与纯水透过性常数、纯盐透过性常数等相关,如式(4)所示。浓水流量为给水和产水流量之差,如式(5)所示。给水流量为上一支膜的浓水流量,如式(6)所示。给水浓度为上一支膜的浓水浓度,如式(7)所示。反渗透过程满足物料平衡,如式(8)所示。

$$P_{a,n} = (P_{f,n} + P_{f,n+1})/2 \quad (1)$$

$$\pi_{f,n} = \frac{0.2641 \times C_{f,n} \times (T + 273)}{1000000 - C_{f,n}} \quad (2)$$

$$Q_{p,n} = A \times S \times (P_{a,n} - P_{p,n} - \pi_{f,n}) \quad (3)$$

$$C_{p,n} = \frac{B \times C_{a,n}}{A \times (P_{a,n} - P_{p,n} - \pi_{f,n})} \quad (4)$$

$$Q_{b,n} = Q_{f,n} - Q_{p,n} \quad (5)$$

$$Q_{f,n} = Q_{b,n-1} \quad (6)$$

$$C_{f,n} = C_{b,n-1} \quad (7)$$

$$Q_{f,n} \times C_{f,n} = Q_{b,n} \times C_{b,n} + Q_{p,n} \times C_{p,n} \quad (8)$$

式中, $P_{a,n}$ —— 高压侧平均压力, MPa; $P_{f,n}$ —— 本支膜给水压力, MPa; $P_{f,n+1}$ —— 下一支膜给水压力, MPa; $\pi_{f,n}$ —— 给水渗透压, MPa; $C_{f,n}$ —— 给水浓度, mg/L; $Q_{p,n}$ —— 产水流量, m³/h; A —— 纯水透过性常数; S —— 膜面积, m²; $C_{p,n}$ —— 产水浓度, mg/L; B —— 纯盐透过性常数; $C_{a,n}$ —— 高压侧平均浓度, mg/L; $P_{p,n}$ —— 产水侧压力, MPa; $Q_{b,n}$ —— 浓水流量, m³/h; $Q_{f,n}$ —— 给水流量, m³/h; $C_{b,n-1}$ —— 上一支膜浓水浓度, mg/L; $Q_{b,n-1}$ —— 上一支膜浓水流量, m³/h; $C_{b,n}$ —— 浓水浓度, mg/L; T —— 温度, °C。

3.2 反渗透系统经济模型

反渗透海水淡化系统产水费用主要与泵组、预处理、膜组件和能量回收设备相关^[13]。

3.2.1 泵组

泵组固定投资与流量和差压相关,可由式(9)表示。

$$CC_{pg} = \begin{cases} 0.045 \times (\Delta P_{pg} \times Q_{pg} \times 10)^{0.96}, & Q_{pg} > 200 \text{ m}^3/\text{h} \\ 0.042 \times (\Delta P_{pg} \times Q_{pg} \times 10), & Q_{pg} < 200 \text{ m}^3/\text{h} \end{cases} \quad (9)$$

式中, Q_{pg} —— 泵组流量, m³/h; ΔP_{pg} —— 泵组差压, MPa; CC_{pg} —— 泵组投资费用, 万¥。

3.2.2 膜组件

膜组件投资包括压力容器和反渗透膜费用。

$$CC_m = CC_{pc} \times N_{pc} + CC_{ms} \times N_m \quad (10)$$

式中, CC_m —— 膜组件投资费用, 万¥; CC_{pc} —— 压力容器投资费用, 万¥; N_{pc} —— 压力容器数量; CC_{ms} —— 膜元件投资费用, 万¥; N_m —— 膜元件数量。

3.2.3 预处理

预处理费用 CC_f (万¥) 主要由给水流量确定:

$$CC_f = 0.486 \times (Q_{if} \times 24)^{0.8} \quad (11)$$

式中, Q_{if} —— 采水流量, m³/h。

3.2.4 能量回收装置

$$CC_{px} = \begin{cases} 2.539 \times Q_{b,n}^{0.58}, & 3 \text{ m}^3/\text{h} < Q_{b,n} < 50 \text{ m}^3/\text{h} \\ 0.681 \times Q_{b,n}^{0.98}, & 50 \text{ m}^3/\text{h} < Q_{b,n} < 200 \text{ m}^3/\text{h} \end{cases} \quad (12)$$

$$C_e = W_p - W_{er} \quad (13)$$

$$W_p = \frac{\Delta P_{pg} \times Q_{pg}}{3.6 \times \eta_{pg}} \quad (14)$$

$$W_{er} = (P_{a,n} - P_{p,n}) \times Q_{b,n} \times \eta_{px} / 3.6 \quad (15)$$

式中, CC_{px} —— 能量回收装置投资费用, 万¥; C_e —— 海水淡化系统消耗的能量, kWh; W_p —— 泵组消耗的能量, kWh; W_{er} —— 能量回收装置回收的能量, kWh; η_{pg} —— 泵组效率; η_{px} —— 回收效率。

综上,可得出反渗透海水淡化系统总投资为:

$$CC_t = CC_f + CC_{pg} + CC_{px} + CC_m \quad (16)$$

式中, CC_t —— 反渗透海水淡化系统总投资, 万¥。

4 风电反渗透系统优化模型

风电反渗透系统优化模型可根据系统结构划分为风电产出、储电、海水淡化、设备规模和经济性核算环节。

4.1 风电产出

风电产出是风电反渗透系统优化模型的第一个环节。在此环节中,每一时刻,风电场总产电量为各风力发电机发电量之和,可表示为:

$$ep_{m,hr} = N \times Pw_{m,hr} \quad (17)$$

式中, $ep_{m,hr}$ —— 风电场各时刻的总产电量, kWh; N —— 风力发电机数量; $Pw_{m,hr}$ —— 单个风力发电机的出力, kWh; m —— 月份; hr —— 一天的时刻。

模型的最小时间间隔为 1 h, 总的时间尺度为 1 a, 因此总的时刻数为 8760 h。为了降低模型的复杂度, 需对时间尺度进行压缩。因此, 本文采用代表日的方法, 即假设每个月均有一个代表日, 当月每一天的能源需求和供给特性均统一符合代表日的特性。这样时间尺度就从 8760 h 压缩到 288 h (12×24), 大幅降低了模型的维度, 提高了优化的效率。

弃风是降低风电波动性的方式之一, 因而风电场的总产电量可表示为:

$$ep_{m,hr} = eu_{m,hr} + ec_{m,hr} \quad (18)$$

式中, $eu_{m,hr}$ —— 风电利用量, kWh; $ec_{m,hr}$ —— 弃风量, kWh。风电利用电量又可分为直供系统用电和储能设备储电两部分。

4.2 储电环节

为进一步降低风电的波动性, 风电产出环节后紧跟一个储电环节。风电利用量等于储能设备的出口电量与储能设备的净储电量之和。其中, 净储电量是指储能设备释放电能和储存电能之差。储能设备的能量平衡可表示为:

$$eu_{m,hr} - es_{m,hr} + er_{m,hr} \times \eta_e = e_{m,hr} \quad (19)$$

式中, $es_{m,hr}$ —— 储存到储能设备的电量, kWh; η_e —— 储能设备的效率; $er_{m,hr}$ —— 储能设备释放的电量, kWh; $e_{m,hr}$ —— 储能设备的出口电量, kWh。

每一时刻, 储能设备中的总储能能量随着净储能能量而改变, 可由式(20)表示:

$$st_{m,hr+1} = st_{m,hr} + es_{m,hr} - er_{m,hr} \geq 0 \quad (20)$$

式中, $st_{m,hr+1}$ —— 储能设备内储存的电量, kWh。

储电量不可大于储能设备当前时刻剩余储电容量:

$$es_{m,hr} \leq S_e - st_{m,hr} \quad (21)$$

式中, S_e —— 储能设备容量。

另外, 储能设备的放电深度不易过大, 否则会显著降低设备寿命, 因此放电过程需满足:

$$er_{m,hr} \leq st_{m,hr} \times \alpha \quad (22)$$

式中, α —— 放电深度, 可取约 60%。

4.3 海水淡化环节

海水淡化装置的输入电量包括直供系统电量和储能设备补充供电两部分, 海水淡化装置可采用

不同的压力容器, 不同的压力容器的产水量和能耗各不相同。

每一时刻, 海水淡化装置的能耗为各种备选压力容器运行部分的能耗之和:

$$e_{m,hr} = \sum_{mbr} k_{mbr,m,hr} \times RE_{mbr} \quad (23)$$

式中, $k_{mbr,m,hr}$ —— 各种压力容器的每一时刻的运行数目, 为整数变量; RE_{mbr} —— 各种压力容器的运行 1 h 的能耗, kWh; mbr —— 压力容器类型, 分别代表装有 6、7、8、9、10 支膜的压力容器。

每一时刻, 海水淡化装置的产水量为各种备选压力容器运行部分的产水量之和:

$$w_{mbr,m,hr} = \sum_{mbr} k_{mbr,m,hr} \times wpu_{mbr} \quad (24)$$

式中, $w_{mbr,m,hr}$ —— 海水淡化装置的产水量, m³; wpu_{mbr} —— 各种压力容器的产水量, m³。

海水淡化装置总电耗不仅包括海水淡化装置正常运行时的运行电耗, 还有膜组件启动和停机用于膜组件清洗的能耗, 近似为膜组件正常运行半小时消耗的电能。每一时刻, 海水淡化装置总电耗:

$$etot_{m,hr} = e_{m,hr} + eu_{m,hr} + ed_{m,hr} \quad (25)$$

启动电耗 $eu_{m,hr}$ 和停机电耗 $ed_{m,hr}$ 分别可表示为:

$$eu_{m,hr} = \sum_{mbr} ku_{mbr,m,hr} \times RE_{mbr} / 2 \quad (26)$$

$$ed_{m,hr} = \sum_{mbr} kd_{mbr,m,hr} \times RE_{mbr} / 2 \quad (27)$$

式中, $ku_{mbr,m,hr}$ —— 任一时刻启动的压力容器数; $kd_{mbr,m,hr}$ —— 任一时刻停机的压力容器数。

$ku_{mbr,m,hr}$ 和 $kd_{mbr,m,hr}$ 均为整数变量, 需分别满足:

$$ku_{mbr,m,hr} = k_{mbr,m,hr+1} - k_{mbr,m,hr} \quad (28)$$

$$kd_{mbr,m,hr} = k_{mbr,m,hr-1} - k_{mbr,m,hr} \quad (29)$$

另外, 还需同时满足:

$$0 \leq ku_{mbr,m,hr} \leq k_{mbr,m,hr} \quad (30)$$

$$0 \leq kd_{mbr,m,hr} \leq k_{mbr,m,hr} \quad (31)$$

4.4 设备规模

优化模型除了对于风电海水淡化装置中的各种能量关系作出规定外, 还需考虑设备供能能力的限制。各种设备规模必须足够大, 从而满足各环节各种技术的供能能力的要求。需要配置的压力容器应大于等于各时刻运行的各种压力容器数:

$$num_{mbr} = \max_{m,hr} k_{mbr,m,hr} \quad (32)$$

式中, num_{mbr} ——压力容器数量, 为整数变量。

储能容量取决于最大储电量, 可表示为:

$$Se \geq \max st_{mbr,m,hr} \quad (33)$$

另外, 为了保证系统安全运行, 储能设备还需存有满足整个海水系统一小时产出所需的电量:

$$Se \geq Se_{\min} \quad (34)$$

式中, Se_{\min} ——储能设备最小蓄电量。

4.5 经济性核算

本文建立的风电海水淡化系统优化设计模型以年总成本为目标函数。年总成本包括投资成本和运行维护成本。投资成本通过总设备投资折旧到其运行期内的每一年来决定。模型通过最小化年总成本来获得风电海水淡化系统的最优配置, 如式(35)所示。

$$\text{Min}C_{\text{tot}} = C_{\text{cpt}} + C_{\text{o\&m}} \quad (35)$$

投资和运行维护成本分别由式(36)和式(37)表示:

$$C_{\text{cpt}} = N \times UI_{\text{tb}} \times \frac{I}{1-(1+I)^{-Y_{\text{tb}}}} + num_{mbr} \times UI_{mbr} \times \frac{I}{1-(1+I)^{-Y_{mbr}}} + Se \times UI_{\text{es}} \times \frac{I}{1-(1+I)^{-Y_{\text{es}}}} \quad (36)$$

$$C_{\text{o\&m}} = OM_{\text{tb}} \sum_m \sum_{hr} e_{m,hr} \times d_m + OM_{mbr} \sum_m \sum_{hr} w_{m,hr} \times d_m + OM_{\text{es}} \times Se \quad (37)$$

式中, UI ——设备的单位投资成本, 万¥; Y ——设备寿命; I ——折旧率; OM ——单位运行成本, 万¥; d_m ——每个月的天数; 下标 tb 、 es ——风力发电机和储能设备。

在设定参数条件下, 通过求解这个混合整数数学规划问题, 即可得到海水淡化和储能设备的最优规模以及与风资源变化紧密相关的水淡化系统变负荷运行方式及储能设备充放电运行方式。

5 实例

本文仿真实例采用上述设计方法进行风电反渗透海水淡化系统优化设计。海水淡化系统以压力容器作为最小单元, 共设置5种类型压力容器, 分别可装置6、7、8、9、10支膜元件。采用东海大桥风资源数据, 设置两台3 MW 风力机组成风电场作为电源。风力发电机固定投资费用为1.2万¥/kW, 运行维护费用为0.14¥/kWh。采用铅酸蓄电池作为储能

设备, 其蓄电效率为80%, 使用寿命8 a, 固定投资2000¥/kW, 运行维护费用195¥/(kWh·a)。

反渗透海水淡化系统固定投资由其经济模型估算, 运行维护成本包括化学药品0.5¥/t、膜更换费用0.5¥/t、职工工资福利约0.2¥/t、设备检修维护费用为0.2¥/t。系统可根据电源波动情况变负荷运行, 假设供水价格为7¥/t, 投资折现率10%, 工程使用年限为20 a^[14]。

根据反渗透海水淡化系统模型和经济模型, 5种压力容器的成本和能耗特性如表1所示。

表1 压力容器性能参数

Table 1 Performance parameters of pressure vessels

膜支数量	6	7	8	9	10
投资成本/¥	10501	10140	10006	10029	10161
产水能耗/kWh·m ⁻³	3.55	3.40	3.31	3.25	3.22

通过风电海水淡化系统综合优化, 得出最优储能设备容量、系统产水量、总发电量、弃电量, 并得到年均利润、年收益等经济指标, 如表2所示。其中, 系统最佳配置为由83个装置9支膜的压力容器组成海水淡化系统。同时, 结合全年各时刻的风电场输出功率, 得出对应的海水淡化系统用电量、蓄电池储电量、蓄电池放电量、各种投运压力容器的数量、系统产水量等信息, 从而获得海水淡化系统最佳变负荷运行方式, 如表3所示。

表2 风电海水淡化系统最佳配置

Table 2 Optimal allocation of wind power seawater desalination

系统相关费用	数值	产出	数值
年均利润/万¥	453.82	储能设备容量/MWh	1.27
年收益/万¥	3017.04	总发电量/GWh	24.37
投资成本/万¥	1593.76	弃电量/GWh	7.07
运行维护费用/万¥	969.46	产水量/万m ³	431

由于风电场输出功率不断变化, 而海水淡化系统安全高效运行要求电源功率稳定。因此, 在考虑经济性的条件下, 风能的利用率无法达到100%, 而是根据其变化情况, 将风电场输出功率分为3部分, 即直接供给海水淡化系统的电量(简称直供电量)、弃电量和蓄电量。11月份风能利用情况如图3所示。11月份风电场共计发电38551 kWh, 其中, 直供电量占92.8%, 弃电量占5.1%, 蓄电量占2.2%。10:00~14:00风电场发电量大于系统需求电量, 因此放弃了部分风能。同时, 为了提高风能利用率, 储能设备储存部分多余的发电量, 并在风

表3 海水淡化系统变负荷运行方式

Table 3 Operation of seawater desalination with variable load

时刻	1月份	2月份	3月份	4月份	5月份	6月份	7月份	8月份	9月份	10月份	11月份	12月份
01:00	58	78	78	83	83	83	83	51	60	80	50	83
02:00	58	78	78	79	83	83	83	48	60	80	50	83
03:00	58	82	78	79	83	83	83	48	60	80	50	83
04:00	58	83	80	79	83	83	83	48	61	80	50	83
05:00	69	83	81	68	83	83	83	48	61	83	61	83
06:00	69	83	80	61	83	83	83	48	61	83	61	83
07:00	69	83	79	61	83	83	83	52	70	83	62	83
08:00	69	83	78	61	83	83	83	53	70	83	62	83
09:00	70	83	78	61	83	83	83	83	70	83	70	83
10:00	70	83	78	63	83	83	83	83	83	83	70	83
11:00	70	83	81	83	83	83	83	83	83	83	83	83
12:00	70	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83
13:00	70	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83
14:00	68	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83
15:00	68	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83
16:00	68	83	83	83	83	83	83	83	83	83	70	83
17:00	78	83	83	83	83	83	83	83	83	83	70	83
18:00	78	83	83	83	83	83	83	83	83	83	70	76
19:00	69	83	74	83	83	83	83	83	83	83	70	76
20:00	65	83	74	83	83	83	83	82	83	83	66	76
21:00	58	83	74	83	83	83	83	82	83	83	66	76
22:00	58	83	74	83	83	83	83	82	73	83	59	76
23:00	58	78	78	83	83	83	83	71	60	83	58	80
24:00	58	78	78	83	83	83	83	59	60	83	58	81

注:表中数值为投运压力容器数量,投运的压力容器均为装置9支膜元件的压力容器。

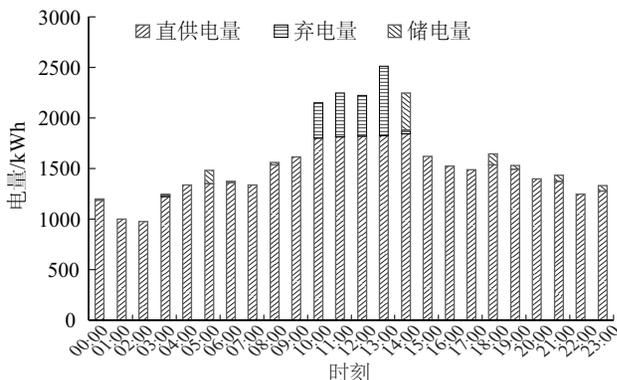


图3 11月风能利用情况

Fig. 3 The form of use of wind energy in November

电场输出功率不足时释放,用于平抑电源输出功率的小范围波动。11月份储能设备充放电运行情况如图4所示。00:00、03:00、05:00、06:00、08:00、14:00、18:00、19:00、21:00、23:00时风电场发

电量大于系统正常运行所需电量,储能设备储存多余电能;01:00、02:00、04:00、07:00、09:00、10:00、15:00、16:00、17:00、20:00、22:00时风电场发电量小于系统正常运行所需电量,储能设备放电,为系统负载补充供电。

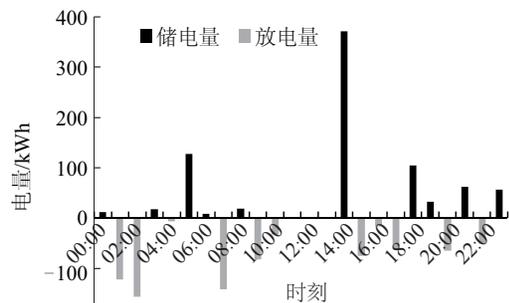


图4 11月份储能设备充放电运行情况

Fig. 4 Operation mode of energy storage equipment in November

11月份系统供电量与产水量关系如图5所示。从图5中可看出,系统供电量由系统直供电量和储能设备补充供电量两部分组成。当风电场输出功率在小范围内波动时,采用储能设备补充供电的方式维持海水淡化系统稳定运行,即图5中00:00~03:00、04:00~07:00、10:00~14:00时;当风电场输出功率波动范围超出储能设备补充供电能力时,海水淡化系统根据表3变负荷运行,以适应电源输出功率的变化,并保证海水淡化系统高效运行。11月份海水淡化系统产水量在330~560 t/h之间变化,由表3可知,相应地,投入运行的压力容器数量在50~83之间变化。

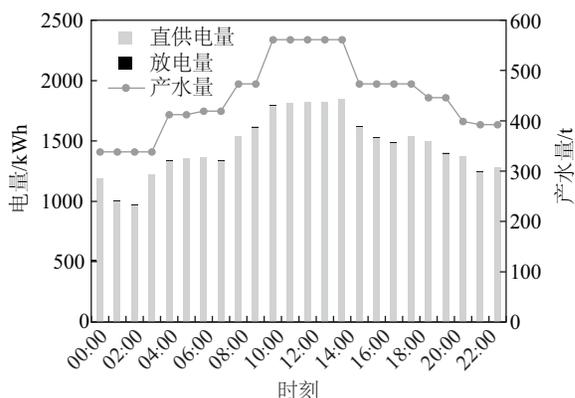


图5 11月份系统供电量与产水量关系图

Fig. 5 Relationship between electricity supply and water yield in November

6 结论

本文以提高风资源的利用效率和解决供水问题为目的,以系统整体经济性最高为目标,提出一种风电海水淡化系统设计方法。依据算例结果,通过该方法可根据风资源得出各时段海水淡化系统投运压力容器的最佳数量和储能设备最优规模及运行方式,实现离网型风电利用率71%,年产水量431万t,吨水利润1.053 ¥/t,海水淡化系统年投运率87.7%,对实际系统设计具有一定指导意义。由于风电海水淡化系统起停次数比常规海水淡化系统多,对膜元素的保护提出了更高要求,因而应进一步研究风电海水淡化系统的膜清洗和保护策略。

[参考文献]

[1] 国务院. 全国海洋经济发展“十二五”规划[EB/OL]. http://www.gov.cn/zwqk/2013-01/17/content_2314162.htm, 2013-01-17.

htm, 2013-01-17.

- [1] The State Council. 12th five-year plan of national marine economy development economic development [EB/OL]. http://www.gov.cn/zwqk/2013-01/17/content_2314162.htm, 2013-01-17.
- [2] 钟晓红, 赵喜亮, 黎莹, 等. 从战略高度看待我国的海水淡化[J]. 环境保护, 2013, 41(3-4): 55—57.
- [2] Zhong Xiaohong, Zhao Xiliang, Li Ying, et al. A view of seawater desalination in China from a strategic perspective [J]. Environmental Protection, 2013, 41(3-4): 55—57.
- [3] 宿俊山, 高季章. 利用风为能源的海水淡化[J]. 水利水电技术, 2009, 40(9): 25—27.
- [3] Su Junshan, Gao Jizhang. Sea water desalination powered with wind energy [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(9): 25—27.
- [4] 张显球, 杜明霞, 张勇, 等. 太阳能辅助反渗透水处理实验研究[J]. 太阳能学报, 2010, 31(11): 1419—1422.
- [4] Zhang Xianqiu, Du Mingxia, Zhang Yong, et al. Reverse osmosis water treatment employing solar energy [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2010, 31(11): 1419—1422.
- [5] Greenlee L F, Lawler D F, Freeman B D, et al. Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges [J]. Water Research, 2009, 43(9): 2317—2348.
- [6] 顾为东. 大规模非并网风电系统开发与应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 1—4, 9.
- [6] Gu Weidong. Development and application of large-scale non-grid-connected wind power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 1—4, 9.
- [7] 任典勇, 施慧雄. 海岛风能海水淡化组合体系研究[J]. 海洋学研究, 2009, 27(2): 111—113.
- [7] Ren Dianyong, Shi Huixiong. Study on the combining device of wind power generation and seawater desalination [J]. Journal of Marine Sciences, 2009, 27(2): 111—113.
- [8] 陈贞, 倪维斗, 李政. 风电特性的初步研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(2): 210—215.
- [8] Chen Zhen, Ni Weidou, Li Zheng. Preliminary study on wind power characteristics [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2011, 32(2): 210—215.
- [9] 邹见效, 李文, 郑刚, 等. 有功调整提升模式下风电场优化控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(1): 13—20.

- [9] Zou Jianxiao, Li Wen, Zheng Gang, et al. Study on the optimization strategy for wind farm under active power hoisting control mode[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2013, 34(1): 13—20.
- [10] 胡国飞. 东海大桥海上风能资源分析[A]. 全国风力发电技术协作网第二届年会论文集[C], 常州, 2007.
- [10] Hu Guofei. Wind energy resource analysis of East Sea great bridge [A]. *Proceedings of the 2th Annual Wind Power Generation Technology Collaboration Network Conference*[C], Changzhou, 2007.
- [11] 赵波, 王成山, 张雪松. 海岛独立型微电网储能类型选择与商业运营模式探讨[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(4): 21—27.
- [11] Zhao Bo, Wang Chengshan, Zhang Xuesong. A survey of suitable energy storage for island stand-alone microgrid and commercial operation mode [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(4): 21—27.
- [12] 时均, 袁权, 高从增. 膜技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [12] Shi Jun, Yuan Quan, Gao Congzeng. *Membranes technology manual* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001.
- [13] Malek A, Hawlader M N A, Ho J C. Design and economics of RO seawater desalination [J]. *Desalination*, 1996, 105(3): 245—261.
- [14] Käuffer J, Pohl R, Sader H. Seawater desalination (RO) as a wind powered industrial process—Technical and economical specifics [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2011, 31(1-3): 359—365.

ELABORATE DESIGN FOR REVERSE OSMOSIS SEAWATER DESALINATION SYSTEM BASED ON STAND ALONE WIND POWER

Li Chao, Zhou Zhe, Li Liping

(China Power Engineering Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100120, China)

Abstract: Reverse osmosis desalination driven by wind power is a new approach to solve fresh water shortage in coastal areas. In order to reduce the cost and achieve more efficient utilization of resources, an exquisite model for the optimal design of off-grid wind power desalination system was proposed, which was established based on the physical models of wind power, energy storage device and desalination unit. The optimal configuration of desalination system driven by wind power and its best operation regime could be obtained via mathematic optimization. Considering the fluctuation of wind power in the optimization process was the key feature of the model. Under premise of wind energy dynamic change, the optimization design is closer to the reality compared with a simple static one.

Keywords: wind power; seawater desalination; reverse osmosis; system design; stand alone