

风能盐差能 海水淡化系统集成研究

文_ 汤明 中国东方电气集团有限公司
史晓燕 中国成达工程有限公司

摘要: 利用可再生能源进行海水淡化是海水利用的一个重要研究方向。本文构建了一种新型的海水淡化系统,该系统以风力发电机组为主要能源,盐差能发电系统为补充,共同为反渗透海水淡化膜组件提供动力。本文对该系统的构成、运行模式进行了详细介绍,并对反渗透海水淡化分系统和渗透压能法盐差能发电分系统共用膜组件的理论可行性进行了探讨,为盐差能发电系统与风能海水淡化系统集成的工程应用提供参考。

关键词: 风能; 盐差能; 海水淡化; 反渗透; 压力延迟渗透

0 前言

资源是经济发展、社会运行的基本要素,工业革命后,煤炭、石油、天然气等各种矿产资源的大规模利用为经济、社会全面发展奠定了基础。但随之产生的温室气体排放及污染物不断累积,使得环境危机、水危机逐步显现。风能、太阳能、盐差能、地热能、潮汐能等可再生能源技术和海水淡化技术的发展,为改变能源结构、化解淡水资源紧缺,促进经济、社会可持续发展提供了可能。据我国“十三五”规划,非化石能源消费比重将从2015年的12%提高到2020年的15%;海水淡化总规模将达到220 万t/d以上,为现有规模的2倍。

1 风能与盐能

1.1 风能在反渗透海水淡化中的应用

风电以其资源分布广、发电系统技术成熟度高,得到了大规模应用,截止2016年底,我国并网风电装机容量已达1.48亿kW,是我国装机容量最大的清洁能源。

反渗透、多级闪蒸、低温多效是当今海水淡化三大主流技术,其中反渗透法以其操作过程无相变、出水品质好、能耗相对较低等优势,在海水淡化工程领域应用最为广泛。即便如此,接入公共电网的传统反渗透海水淡化系统能源消耗费用仍约占总运行费用的30%~60%,属能源密集型工业。

风电单位发电容量投资额高于火电,但风电不需燃料,具有运营费用低、建设周期短、靠近用户端建设时输配电投资小等优势,风电综合成本与电网工业用电价格相比并无明显劣势。且风电属清洁可再生能源,环境友好无排放,加之离网型风电无需配备并网设备,建造成本更加低廉,使得利用离网风电为海水淡化提供能源成为研究方向。2014年江苏大丰建成10000m³/d非并网风力发电淡化海水示范项目,使用1台2.5MW永磁直驱

风电机组提供能源。

1.2 盐差能

盐差能是淡水与盐水或不同浓度盐溶液之间的化学势能差,河水与海水之间的盐差能约相当于270m高水柱势能。随着压力延迟渗透膜研究的不断深入,渗透压能法盐差能发电能量密度(单位膜面对应的电功率 kW/m^2)逐渐得到提高。

2 风电海水淡化系统与盐差能发电系统

2.1 风电反渗透(RO)海水淡化系统

风电海水淡化系统是将风能发电系统与海水淡化系统进行耦合,用风能作为能源生产淡水的系统。风流经叶轮表面驱动风机旋转,风机带动电机将风能转化为电能为反渗透海水淡化系统提供动力,海水经泵加压后流经反渗透膜组件,水分子在压力驱动下透过反渗透膜,膜上游截留其它离子形成浓缩海水,膜下游产出淡水。

2.2 渗透压能法盐差能发电系统

渗透压能法盐差能发电是利用压力延迟渗透(PRO)膜分隔不同浓度盐溶液,在高浓度溶液侧施加不高于渗透压差的压力,在渗透压差的驱动下水分子由低浓度侧向高浓度侧迁移,盐差能转化为由低浓度溶液侧迁移进入高浓度侧水的势能,再经水轮机将势能转化电能,实现盐差能发电。

2.3 离网型风电海水淡化系统与盐差能发电系统耦合

风能在时间维度上的不稳定性是其主要劣势。虽然风电并网技术得到持续改进,风电场并网、储能设备投入大幅增加,但风电稳定、持续并网的理想状态仍不能实现。近年来“弃风”现象愈加严重,2016年全国平均弃风率17.1%,全国最高弃风率达43%(甘肃)。

离网型风电海水淡化系统可将供电转化为供水、储能转化为储水,不但可以避开风

电不稳定性、电能不便储存的劣势,还能减少风电并网、储备设备的投资,降低海水淡化能源成本。海水淡化产生的浓缩液直排会对局部海域生态造成冲击,如将盐差能发电系统与海水淡化系统耦合,即能回收利用海水淡化浓缩液中的盐差能、降低浓缩海盐水对环境的影响,还能提高能源利用效率、平抑海水淡化系统由于风能不稳定造成的运行波动。

3 离网型风电海水淡化系统与盐差能发电系统集成

3.1 系统构成

离网型风电海水淡化与盐差能发电集成系统由风能发电系统、反渗透海水淡化系统、盐差能发电系统构成,如图1所示。其中反渗透海水淡化系统与盐差能发电系统均采用对水分子具有选择透过性的膜,可共用膜组件。

盐差能发电系统由增压泵、水轮发电机组和与反渗透系统共用的膜组件构成。

3.2 共用膜组件可行性分析

反渗透(RO)和压力延迟渗透(PRO)都是在压力差(渗透压与外加压力之和)的驱动下,被分隔在膜两侧不同浓度溶液中的溶剂通过对具有选择透过性的膜(亦称半透膜)进入另外一侧的过程,在此过

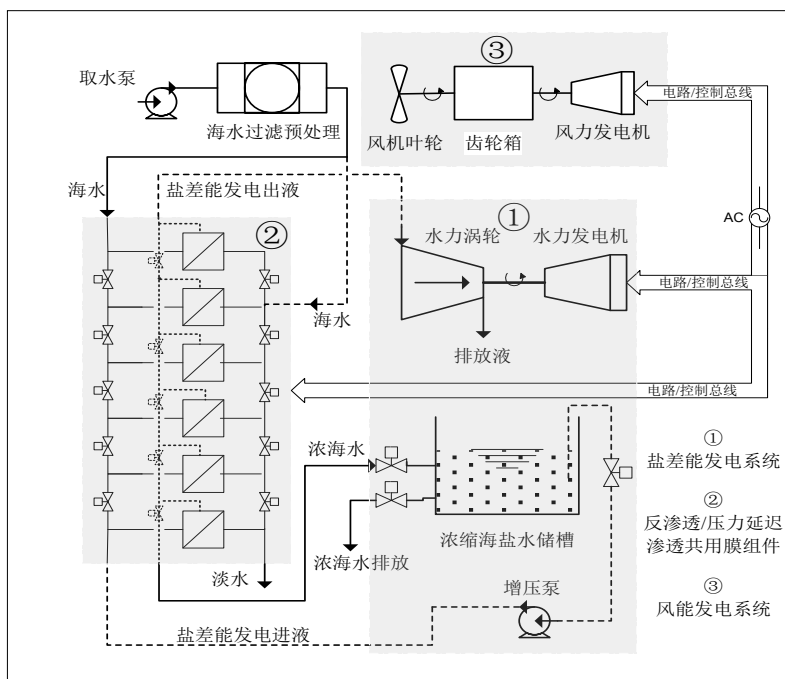


图1 风能盐差能海水反渗透淡化结构图

程中理想状态下溶质不通过膜发生迁移。如图2所示，膜两侧液体的所受外压差为 $\Delta p = p_1 - p_2$ ，膜两侧溶液的渗透压差为 $\Delta \pi = \pi_1 - \pi_2$ 。当 $\Delta p > \Delta \pi$ ，溶剂从高浓度侧透过膜进入低浓度侧称之为反渗透（RO）；当 $0 < \Delta p < \Delta \pi$ 溶剂从低浓度侧透过膜进入高浓度侧称之为压力延迟渗透（PRO）。

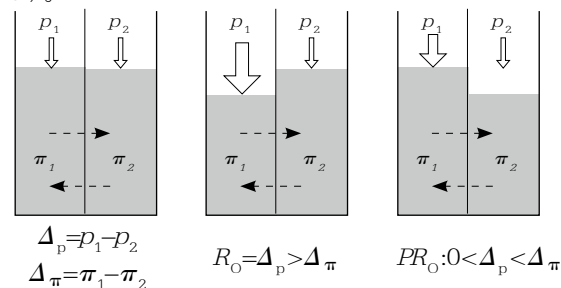


图2 反渗透（RO）、压力延迟渗透（PRO）示意图

反渗透海水淡化膜组件和盐差能发电系统所用膜组件均使用仅对水分子具有选择透过性的膜，海水中盐离子无法透过膜发生迁移。当对膜两侧不同浓度的溶液施以不同的外压力，即可分别实现反渗透（RO）过程和压力延迟渗透（PRO）过程。

通过专家对海盐水渗透压进行探讨得出的数据，25℃浓度3.4448%海水渗透压 π_1 为2.464MPa；25℃浓度7%海水渗透压 π_2 约为5.260MPa。在本文构建的系统中，膜组件在RO海水淡化系统中运行时，膜两侧液体渗透压差为 $\Delta \pi = \pi_1 = 2.464\text{MPa}$ ，需在海水侧施加大于2.464MPa外压；膜组件在盐差能发电系统中运行时，膜一侧为海盐水，另一侧为海水浓缩液（海水淡化系统出水率按50%计，海水浓缩液浓度按7%计），则膜两侧液体渗透压差 $\Delta \pi = \pi_2 - \pi_1 = 2.796\text{MPa}$ ，需在浓缩海水侧施加小于2.796MPa外压。

3.3 系统运行模式

当风速波动较小时，风电机组提供稳定电能驱动高压泵，汲取海水并加压至RO组件操作压力，在压力的驱动下海水中的水分子透过RO膜，由海水侧进入膜另外一侧输出淡水，浓缩海水被收集在浓缩池中。为提高RO系统能量利用效率，在浓缩海水排除前设置压力交换器，海水浓缩液势能回收效率达95%以上。

当风速波动，不能维持RO海水淡化系统稳定运行时，启动盐差能发电系统。此时，高压泵从浓缩海水池汲

取溶液并增压流经膜组件上游，海水循环泵驱动海水流经膜下游，在压差的驱动下海水中的水分子进入浓缩海盐水中，盐差能转化为渗透水分子势能，浓缩海盐水质量增加浓度降低，流经水轮机组做功，实现盐差能转化为电能。在此过程中，膜组件盐差能发电理论功率可用下式计算：

$$W = \alpha \times (\Delta \pi - \Delta p) \times \Delta p$$

式中： W 为膜组件的功率密度， W/m^2 ； α 为半透膜渗透系数， $m/s \cdot p_a$ ； $\Delta \pi$ 为膜两侧不同浓度盐溶液渗透压差， p_a ；在海水浓度与浓缩海盐水浓度不变的情况下 $\Delta \pi$ 为定值，膜组件材质确定时 α 为定值。由以上算式可知，在膜两侧操作压力差 $\Delta p = 1/2 \Delta \pi$ 时，膜组件理论功率达到最大值。

在不同的风速下，系统运行模式如表1所示。

表1

风速	风速
风速≥设计风速	· 风力发电机通过变桨系统调节电能功率输出等于设计功率
	· RO 系统在设计产能下运行
	· 膜组件全部用于 RO
风速≤设计风速	· 风力发电机以最高效率运行（风能利用最大化）
	· 部分膜组件从 RO 系中切出
	· 切出膜组件并入盐差能 PRO 系统运行，补偿部分风能缺口

3.4 系统特点分析

风能发电系统、反渗透系统、盐差能发电系统构建的新型海水淡化系统，以风能为主，盐差能为辅，为反渗透海水淡化系统运转提供稳定的能源。与传统风电海水淡化系统相比，新构建的系统具有构造简单、操作柔性大、环境友好、便于维护等优点。

3.4.1 中系统构造简单、建造维护成本更低

传统离网型风电海水淡化系统以往多采用蓄电池组、柴油发电机组、光伏发电机组等其他储能、发电系统作为平抑风能波动的手段，系统构建相对复杂、初期投资成本高。经对海岛离网型风能海水淡化系统研究认为30t/d以下的水淡化装置适合引入储能电池，但电池组重量已达19t，体积6.8m³。

本文构建的风能盐差能海水淡化系统中的海水淡化系统和盐差能发电系统共用膜组件，只需在传统风能海水淡化系统上增加海水浓缩液水池、浓缩液增压泵、水力涡轮发电机组等设备、设施即可实现，系统构成简练，泵、水

力涡轮发电机等分系统及设备技术成熟度高、性能稳定、成本低廉,具有建造费用低、运营维护简单的优点。

3.4.2 系统操作柔性大

模块化设置膜组件,各膜组件并联运行,根据风能波动情况确定膜组件操作运行模式,系统操作柔性大。风能大于系统设计需求时,膜组件全部投入RO系统生产淡水;风能小于设计需求时,部分膜组件从RO系统中切出,并入盐差能发电系统发电,弥补风能不足,维持系统稳定;在无风情况下,可利用浓缩液水池存水发电,进行有限应急供水。

3.4.3 环境友好、对海洋生态影响较小

如海水淡化系统浓缩液直接排入海洋,会改变局部海域海盐浓度,对区域海洋生物生存环境造成不利影响。本文构建的海水淡化系统,利用海水淡化截留盐浓缩液发电,在盐差能发电系统中浓缩液被海水稀释后排入海洋,降低了排放液盐浓度,减少了排放对局部海洋生态的影响。

3.5 尚待进一步研究的问题

高性能选择性透过膜及膜组件的研制是决定反渗透海水淡化系统和盐差能发电系统经济性的关键,其核心是高选择性、高通量半透膜。同时,如何提高膜组件的抗污性、降低膜表面浓差极化现象对膜性能影响,让高性能半透膜在膜组件中发挥最大效能也是重要研究方向。盐差能实验电站与理论模型功率之间差距较大,经专家对盐差能发电系统进行研究分析得出,如水轮机组效率按70%计,模型系统理论功率达到 $8.5\text{W}/\text{m}^2$;2015年有报道显示荷兰特文特大学纳米研究所建造的盐差能试验电站(膜面积 400m^2)开始运行,功率为 $1.3\text{W}/\text{m}^2$,离实现该试验电站经济盈利的功率 $2\sim 3\text{W}/\text{m}^2$ 还有较大距离。

离网型风能盐差能海水淡化系统,未与主干电网连接,虽省去了并网设备、降低了建设投资,但由于缺少外部电网的支持,对系统自身的稳定性提出了更高的要求。对该系统继续深入研究,构建适宜的控制系統,对平抑风能波动,提高系统稳定性至关重要。

4 总结

本文构建了一种新型离网型风能盐差能海水反渗透淡化系统,该系统由风能发电系统、反渗透海水淡化系统和盐差能发电系统构成。提出了反渗透系统和盐差能发

电系统共用膜组件的设想,并结合反渗透(RO)和压力延迟渗透(PRO)的理理论论证了共用膜组件的理论可行性。

盐差能发电系统利用风能海水淡化系统的副产物浓缩海盐与普通海水之间的盐差能发电,电能用于海水淡化系统自身运行、平抑风能波动造成的系统扰动,在无风情况下仍可提供有限的应急供水能力。

该系统还有结构简练、对区域海洋环境影响小等特点,但同时也对膜组件性能、系统稳定运行控制方面提出了更高的要求。

参考文献

- [1]冯厚军,谢春刚.中国海水淡化技术研究现状与展望[J].化学工业与工程,2010,27(2):103-109.
- [2]胡立伟,译.海水淡化(RO)应用风力发电的技术经济分析[J].珠江现代建设,2012,168:25-28.
- [3]李超.基于离网型风电的海水淡化系统建模方法[J].电力建设,2014,35(7):141-145.
- [4]李超,周喆,李利平.基于离网型风电的海水淡化系统优化设计[J].中国电力,2015,48(6):107-112.
- [5]黄晶晶,姚兴华.风电反渗透海水淡化耦合系统中高压泵的选择分析[J].电力勘探设计,2014,3:68-72.
- [6]贾洪惠.蓄能器在风能RO淡化系统中的试验研究[D].山东:山东大学能源与动力工程学院,2015.
- [7]汤群益.风光柴海水淡化综合系统工程设计方案及应用浅析[J].风能,2014,12:104-106.
- [8]李铭,刘贵利,孔心亮.中国大规模非并网风电与海水淡化制氢基地的链合布局[J].资源科学,2008,30(11):1633-1639.
- [9]郝晓地.海水淡化+风能发电+盐业化工三位一体的清洁生产技术[J].节能环保技术,2016,10:25-28.
- [10]Guy Z. Ramon, Benjamin J. Feinberg, Eric M. V. Hoek. Membrane-based production of salinity-gradient power [J]. Energy & Environmental Science, 2011, 4(11): 4423-4434.
- [11]殷琦.海盐水溶液渗透压计算的探讨[J].水处理技术,1989,15(6):339-344.
- [12]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):111-118.
- [13]王婉君,朱永强,夏瑞华.集成于海水淡化系统的盐差能发电系统性能分析[J].可再生能源,2016,34(7):1101-1106.