

非并网风电单台风机日产万吨海水淡化系统研究

施建中

(江苏省宏观经济研究院,南京 210013)

[摘要] 为了缓解我国淡水缺乏的现状,将海水进行淡化成了一个主要的研究方向。针对传统海水淡化方法属高耗能产业,并且使用常规能源,对环境易造成二次污染的缺陷,介绍了一种基于非并网多能源协同供电的海水淡化系统。该系统基于非并网风电原理,利用风、光、潮汐等绿色能源对海水淡化系统供电,提高了能源的利用效率,实现二氧化碳的零排放,具有很好的社会效益。本文设计并研发了一套单台风机日产万吨海水淡化系统,该系统利用1台2.5 MW风机对海水淡化系统供电,基于非并网风电理论,做到了风电高效、低成本、全部利用。

[关键词] 非并网;风网互补;多能源协同;海水淡化;变频

[中图分类号] TK89 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2015)03-0035-06

1 前言

我国的淡水资源总量为 $2.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占全球水资源的6%。但是人均只有 $2\,200 \text{ m}^3$,仅为世界平均水平的1/4,美国的1/5,在世界上排第121位。我国年均缺水 $4 \times 10^{10} \text{ m}^3$,在全国600多座建制的城市中,2/3的城市缺水,400余座城市供水不足,110余座城市严重缺水^[1]。而且水污染问题日趋严重,3亿多农民引用水不合格。我国也被联合国列入全球13个“水资源紧缺国家”。有些地区由于缺水过度开采地下水,导致建筑物损坏,道路、桥梁、地下管道开裂,铁路扭曲变形,防洪堤坝维护费用增加,沿海土地受海水入侵、盐渍化严重等一系列严重后果。缺水问题已经成为中国经济增长与发展的控制因素,对个别城市甚至是持续生存的关键。

除中国以外,世界上越来越多的国家即将面临或正在面临着水资源短缺,他们正在积极地探索海

水淡化与利用工艺。海水淡化又称“海水脱盐”,是通过物理、化学或物理化学方法从海水中获取淡水的技术和过程^[2],它是解决水资源短缺的重要途径。已有130多个国家应用海水淡化技术。比较典型的有阿联酋、意大利、以色列、新加坡、西班牙等国家。

我国《海水利用专项规划》指出,到2020年,我国海水淡化能力将达到 $2.5 \times 10^6 \sim 3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$,大幅度扩大和提高海水化学资源的综合利用规模 and 水平,对解决沿海地区缺水问题的贡献率将达到26%~37%。

目前风力发电技术已日趋成熟,但由于其不稳定性,给电网造成较大冲击,大规模并网难以实现,其经济效益在一定程度上也受到了限制。目前,各国都没有通过风能直接进行海水淡化的先例。本文首先介绍非并网风电理论在海水淡化系统中的应用研究以及基于非并网多能源协同供电的海水

[收稿日期] 2014-12-09

[基金项目] 国家科技支撑计划“兆瓦级非并网风电海水淡化系统研发及先导性示范”(2013BAB08B04)

[作者简介] 施建中,1984年出生,男,江苏淮安市人,主要研究方向为非并网风电基础理论与产业化应用;E-mail:sjz@zjzw.net

淡化系统,在此基础上研发了非并网风电日产万吨海水淡化系统。该系统既可以利用风电独立供电,也可进行风电与网电、太阳能等其他可再生能源协同供电,本文主要讨论风电独立供电海水淡化系统。

2 非并网风电理论

风电并网是世界上大规模风电场的唯一应用方式。风的高度不稳定性,导致风电大幅度波动。在没有水电或燃气发电调峰的情况下,风电对电网贡献率难以超过10%。2011年风电限电弃风问题突出,全国约有100亿度风电电量由于被限发而损失,2012年上半年已超过2011年全年弃风量。

非并网风电是指大规模风电直接应用于一系列通过技术创新、能较好应用风电特性的产业^[3]。大规模风电的终端负荷不再是电网,其与蓄电池配套的小型独立运行供电系统也不同,而是将风电直接输送到一些高载能的企业,以期解决无法上网的风电的利用问题。

离网型风电模式风电经蓄电后为负载供电,利用效率降低30%左右,投资却增加约一倍。并网型风电模式风机结构复杂,风电对电网污染严重。在没有燃气发电、水电等调峰时,风电在电网中贡献率一般难以超过10%。而非并网型风电模式利用风/网协同供电,风电、网电相互独立、互不干扰,协同为负载供电。风机结构优化,成本降低,实现风电高效、低成本全部利用。

风电的这种非并网模式,将发电与负载直接耦合为一个“新系统”,其优势体现在以下方面。

1) 采用直流电,回避风电上网电压差、相位差、频率差等难以控制的问题,绕开电网这一限制风电大规模应用的瓶颈,也避免了风电并网对电网系统的影响。

2) 突破终端负荷使用风电的局限,使大规模风电在非并网风电系统中100%利用。

3) 由于没有了上网条件的束缚,风力机可以采用一些低成本、高效能的设备,也可以简化甚至省去成本高、结构复杂的设备。

非并网风/网协同供电的特性关系如式(1)和式(2)所示。

$$\begin{cases} I = U_2/R, 0 \leq U_1 < U_2 \\ I = U_1/R, U_1 \geq U_2 + 0.5 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} I_1 = \alpha U_1 - I_0 - Ae^{-\frac{U_1}{t}} \\ I_2 = I_0 + Ae^{-\frac{U_1}{t}} \\ I = I_1 + I_2 \end{cases} \quad (2)$$

$(U_2 \leq U_1 < U_2 + 0.5)$

式(1)、式(2)中, I 为供电总电流; I_1 为风电电流; I_2 为网电电流; U_1 为风电电压; U_2 为网电电压。 I_0, A, t, α 等参数随网电电压的变化而调整。

目前,非并网风电可以直接应用的高耗能领域主要有:以电解铝为重点的有色冶金工业,盐化工氯碱产业,大规模海水淡化,规模化制氢和以非金属为原料的精深加工产业链等^[4-5]。本文的侧重点在非并网风电在海水淡化系统中的研究与应用。

3 非并网风电在海水淡化系统中的研究

海水淡化技术的研究起源于20世纪50年代中期,到现在,已发展为一种可靠的工业技术。按分离过程分类,海水淡化方法主要有蒸馏法、膜分离法、结晶法、溶剂萃取法和离子交换法等。蒸馏法又分多级闪蒸(MSF)、多效蒸发(MED)、压汽蒸馏(VC)和太阳能蒸馏等;膜分离法分反渗透法(RO)和电渗析法(ED)。其中最适用于大型的海水淡化的方法只有MSF、MED、VC、RO等。现阶段海水淡化技术的发展已进入了一个节能、环保、防垢、高效的阶段,为了更好地实现绿色环保的发展战略,必须运用多种手段对海水淡化技术作进一步的改进和提高。

海水淡化的成本在很大程度上取决于消耗电力和蒸气的成本,国内外大部分海水淡化厂都是和发电厂建在一起,采取海水淡化工程和电力联产联供的建设模式以求降低成本^[6]。而新建火电厂或利用网电,不但会消耗大量的一次能源,造成环境污染^[7],也不利于降低海水淡化的成本,并使市电电网背上沉重的负担。为了降低成本,风能、太阳能等可再生能源和海水淡化技术的结合在近些年逐渐成了主要的研究方向^[8]。

非并网风电海水淡化系统将风电与新型海水淡化直接耦合。文献[9]提出了一种基于风/网协同供电的非并网风电海水淡化系统,该系统主要由非并网风机、控制系统、电力变换器以及海水淡化系统等部分组成,如图1所示。

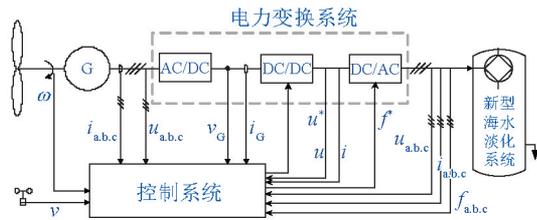


图1 非并网风电海水淡化系统示意图

Fig. 1 Non-grid-connected wind power seawater desalination system

由于没有并网的限制,“非并网风电”将引发风

电机组的极大简化,主要表现在变流器的并网系统和功率系统的简化、输变电线路上各变电站的简化以及风力机设计的简化等。非并网风机最终实现风能利用率的提高和系统成本的降低。

电力变换系统是实现风电海水淡化耦合的关键技术之一,既要实现风能的最大限度捕捉,还应与网电进行协同供电,来适应风电的波动性和间歇性,避免频繁启停对海水淡化系统造成不利影响。

其采用非并网风/网互补协同供电模式,可实现风电的高效利用和生产的最低成本,如图2所示。

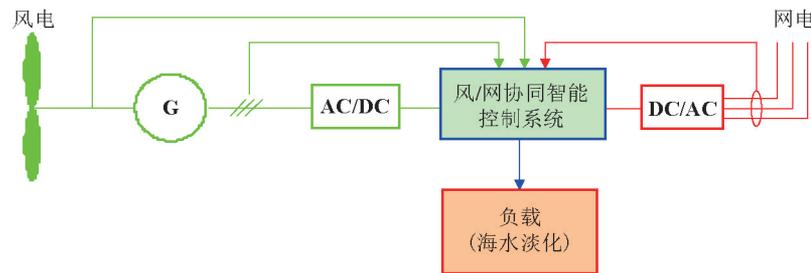


图2 非并网风/网协同供电系统示意图

Fig. 2 Non-grid-connected wind/grid collaborative power supply system

风电和网电经整流后进入到风/网协同智能控制系统,共同给负载供电。当风力发电机输出功率大于负载工作功率时,完全由风电供电,多余部分由风电功率平衡模块消纳;当风力发电机输出功率小于负载工作功率时,不管风力发电机输出功率多少(只要有电),都以风电发电量为基数,与网电同步给负载供电,保证风电100%使用。

其具备以下特点。

1) 非并网供电模式,风电不需要并网,也不使用蓄能装置(如铅酸蓄电池、液流电池、抽水蓄能电站等),与网电同步给负载供电,柔性对接,对电网的影响在其正常波动范围内。

2) 风电智能变换跟踪技术,不管风力发电机输出功率大小(只要有电),都能以风电发电量的多少为基数,与网电同步给负载供电,保证风电100%使用。

3) 风电高效智能缓存技术,对于功率周期性波动的负载,可以大幅度提高风电利用效率,减小负载对电网的冲击。

4) 风力机具有自动变桨限速或偏航限速、自动卸荷、自动停机与开机功能,使系统运行更可靠、稳定、安全和方便。

如果将风电扩展到太阳能、生物质发电等其他可再生能源,则构成了多能源协同供电的海水淡化系统,如图3所示。

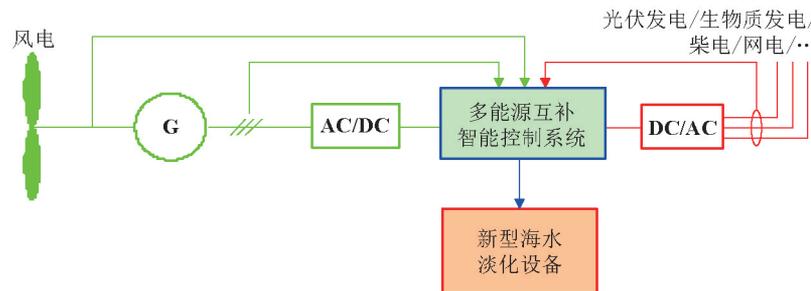


图3 非并网多能源协同供电系统示意图

Fig. 3 Non-grid-connected multi-energy collaborative power supply system

由图3可以看出,非并网多能源协同供电系统是将风电、网电、光伏发电、水电、柴电、余热发电及生物质发电等多种能源产生的电能,通过智能控制系统按一定顺序使用,给海水淡化系统协同供电。根据有无网电,此系统有两种能源供给模式,当有网电时,多能源协同供电模式可以优先使用风电、光伏发电、水电、余热发电及沼气发电等绿色电力,不足部分由网电补充;当无网电时,可以利用上述多种电力进行多能源脱网独立供电。

非并网多能源协同供电系统的核心内涵是把区域优势化的能源放在合适的地域发电,在特定的供电系统中各能源有适当的电力供给比例,协同发挥最优化作用。该系统有许多集中供电系统所不能实现的优势,主要体现在以下几点。

- 1) 能量利用效率高。
- 2) 就地生产,就地利用,能量输配的损失小。
- 3) 各种形式的电力协同配合,按一定优先级为负载供电,使各类能源均发挥最优利用状态。
- 4) 能源系统的安全性高。

非并网多能源协同供电系统采用分布式布局,与集中供电的电网体系形成多层次、多梯度的协同供电网络,不仅提高了国家电网安全运行能力,而且提高了区域特征明显的绿色能源利用效率,解决了电网薄弱地区波动性风电的消纳,增强了电网应对用电负荷波动的能力,还可以解决电网难以延伸的边远地区供电问题。

非并网多能源协同供电系统可以根据地区产业特点,进行整体规划和配置,将电能输出与其他形式能源输出相结合,形成冷、热、电、气、水等综合供给保障体系,为某一区域进行能源综合联供,最优化配置使用能源。

4 单台风机日产万吨海水淡化系统

在日产100 t海水淡化系统的基础上,本文设计了一套非并网风电日产万吨海水淡化系统,该系统由1台2.5 MW风机为海水淡化系统设备供电,其配电网的结构如图4所示。

蓄电装置的作用就是在风能出现波动或是中断的情况时,及时为海水淡化系统的全部负载或是部分负载以及海水淡化系统的保安电源负荷(冲洗泵、提升泵、增压泵等)提供可靠的电能,保证海水淡化系统正常运行。另外,在风能相对比较充足的时间里,启动蓄电装置将富裕的电能转化成化学能

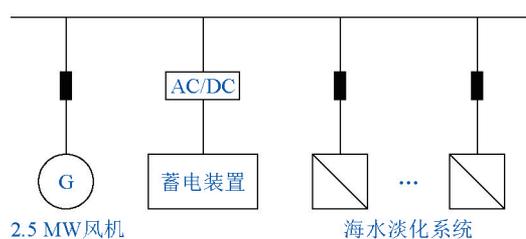


图4 单台风机日产万吨海水淡化系统配电图

Fig. 4 Single fan daily million tons seawater desalination system distribution map

储存起来,待到海水淡化系统需要时再将化学能转换成电能使海水淡化系统能够正常工作。因为蓄电装置的存在,提高了风能利用率,减少了风能的浪费;提升了海水淡化系统的稳定性,相应提升了海水淡化系统的效率。

在日产100 t淡水的情况下,可采用变频控制来适应风电的波动,而当海水淡化系统扩大到 1×10^4 t的时候,单单采用变频控制已不能满足系统的工作需要。

本文设计的万吨级海水淡化电气控制集成系统中的电气部分方案设计主要涵盖了风力发电机组、电力系统接线方式、电力传输方式、海水淡化厂用电母线连接方式、保证系统稳定运行采取的措施和控制原则。为适应非并网风电的特性,保证海水淡化装置运行调整的灵活性,兆瓦级非并网风电淡化海水方案设计了5套,且部分电动机负载加装了变频装置,每套海水淡化装置可以分别独立运行。每套装置在一定的范围内可以连续调整,从而改变出水量,但不会改变电流效率和淡化水的质量。

该套万吨级海水淡化系统如何适应风电波动,本文设计基于兆瓦级风机,其电控系统设计考虑的内容也更为全面。根据海水淡化生产过程特点,对兆瓦级风机运用海水淡化系统的非并网风电电控系统方案进行了研发与设计。基于该电力变换控制系统,风电既可以独立,也可以与蓄电池、柴油机、网电、太阳能发电等协同为海水淡化装置供电。本方案全部采用风电进行供电,同时通过分组运行和蓄电池的协调供电使整个系统运行稳定,实现了所有生产动力全部由风电提供。其控制策略如下。

- 1) 当 $P_{\text{风}} > P_{\text{淡化}}$ 时, $P_{\text{风}}$ 为风力发电机组的实时输出功率, $P_{\text{淡化}}$ 为海水淡化系统的额定功率,此时风力发电机组向海水淡化系统5组RO膜渗透产水机

组供电和为蓄电装置充电直到充满为止,蓄电装置不放电,5组RO膜渗透机组全部运行。

2)当 $P_{\text{风}}=P_{\text{淡化}}$ 时,风力发电机组向海水淡化系统5组RO膜渗透产水机组供电,此时蓄电装置不充电不放电,5组RO膜渗透机组满负荷运行。

3)当 $P_{4\text{组淡化}} < P_{\text{风}} < P_{5\text{组淡化}}$ 时,保持风力发电机组向任意4组RO膜渗透机组供电,4组RO膜渗透机组满负荷运行。

4)当 $P_{3\text{组淡化}} < P_{\text{风}} < P_{4\text{组淡化}}$ 时,保持风力发电机组向任意3组RO膜渗透机组供电,3组RO膜渗透机组满负荷运行。

5)当 $P_{2\text{组淡化}} < P_{\text{风}} < P_{3\text{组淡化}}$ 时,保持风力发电机组

向任意两组RO膜渗透机组供电,两组RO膜渗透机组满负荷运行。

6)当 $P_{1\text{组淡化}} < P_{\text{风}} < P_{2\text{组淡化}}$ 时,保持风力发电机组向任意1组RO膜渗透机组供电,1组RO膜渗透机组满负荷运行。

7)当 $P_{\text{风}} < P_{1\text{组淡化}}$ 时,风电和蓄电池协同为1组RO膜渗透机组供电,1组RO膜渗透机组满负荷运行。当 $P_{\text{风}} < P_{1\text{组淡化}}$ 额定功率约1/2时,海水淡化系统停止运行,风力发电机组为蓄电装置充电。

当风电功率逐步增大时,按照1~7的控制策略反向进行。

其工作模式如表1所示。

表1 单台风机日产万吨海水淡化系统工作模式

Table 1 Single fan daily million tons seawater desalination system working mode

| 海水淡化系统工作状态 | | 风机工作状态 | 蓄电池工作状态 |
|--------------------------|-------------|--------------------------------------|------------------------|
| $P_L \neq 0$ 即海水淡化系统正常工作 | $P_W > P_L$ | $P_B < P_{BMAX}$ $P_B = P_{BMAX}$ | 充电储能 防止过冲 维持原来状态 |
| | $P_W = P_L$ | $P_W + P_B > P_L$ | 放电 |
| $P_L = 0$ | $P_W < P_L$ | $P_W + P_{BMAX} < P_L$ | 放电 |
| | $P_W > 0$ | $P_B < P_{BMAX}$ $P_B = P_{BMAX}$ | 充电储能 防止过冲 |
| | $P_W = 0$ | 断开负载 | |

P_L 代表海水淡化装置的负载需要的能量;风力发电机的发电能量用 P_W 来表示; P_B 代表蓄电装置剩余的能量,蓄电池充满之后的最大能量用 P_{BMAX} 来表示。

对于每组RO膜渗透机组采用变频控制来适应风电的波动。变频器一般采用恒压频比($U/f=常数$)控制,恒压频比变频调速系统的基本原理结构如图5所示,系统由升降速时间设定、 U/f 曲线、sinusoidal pulse width modulation (SPWM)调制和驱动

等环节组成。其中,升降速时间设定用来限制电动机的升频速度,避免转速上升过快而造成电流和转矩的冲击,起软启动控制的作用; U/f 曲线用于根据频率确定相应的电压,以保持压频比不变,并在低频时进行适当的电压补偿;SPWM调制和驱动环节将根据频率和电压要求产生按正弦脉宽调制的驱动信号,控制逆变器以实现电动机的变压变频调速。

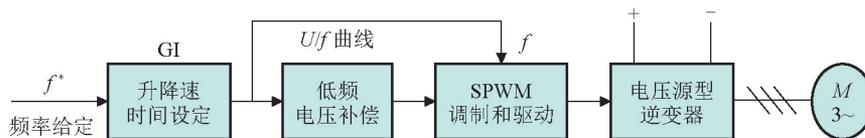


图5 恒压频比变频调速系统原理图

Fig. 5 The speed governor system of frequency conversion of constant voltage frequency ratio principle diagram

5 结语

非并网风电海水淡化系统将风电与海水淡化

直接耦合。针对风电的波动和间歇特性,重点解决两方面的问题:一个是在风电较小时,如何与其他能源协调供电,使系统稳定运行;另一个是新型海

水淡化系统的多工况优化控制,以便适应风电的波动特性,维持单位产水量的能耗基本不变。

非并网多能源协同供电系统区别于常规的离网型风电系统、并网型风电系统和分布式电网系统,是分布式电网的升华,并超越分布式电网电能输入的单一来源,实现了多种电能协同供电。

非并网风电模式,风电不需要并网,全部利用,直接为海水淡化系统供电,采用智能耦合控制技术和风电缓存技术,利用非并网多能源协同供电模式,以获取最大的风电利用效率和经济效益。

本文设计的非并网风电单台风机日产万吨海水淡化系统采用变频与分组运行技术,可适应风电波动,也可与太阳能等其他可再生能源协同供电,不受电力等常规能源限制。无污染、低能耗、运行安全稳定可靠,生产规模可有机组合,适应性好,投资相对较少,产水成本低,可为沿海缺水城市、海岛提供淡水,同时也可以改良内陆盐碱地土壤,解决全球各地盐碱地区居民生活用水问题。

参考文献

- [1] 於方,曹东,王金南. 中国城镇居民生活用水需求与污染压力预测[J]. 资源科学, 2009, 31(1): 75-83.
- [2] Khawaji A D, Kutubkhanah I K, Wei J M. Advances in seawater desalination technologies [J]. Desalination, 2008, 221: 47-69.
- [3] 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.
- [4] 顾为东. 大规模非并网风电系统理论与实践[M]. 南京: 江苏人民出版社, 2014.
- [5] 顾为东. 中国风电产业发展新战略与风电非并网理论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [6] 陈跃华, 安恩科. 海水淡化与火力发电厂现状[J]. 水能源科学, 2007, 25(5): 145-148.
- [7] Lattemann S, Höpner T. Environmental impact and impact assessment of seawater desalination [J]. Desalination, 2008, 220: 1-15.
- [8] He T, Yan L. Application of alternative energy integration technology in seawater desalination [J]. Desalination, 2009, 249: 104-108.
- [9] He Xiaobin, Li Chufu, Gu Weidong. Research on an innovative large-scale offshore wind power seawater desalination system [C]//Proceedings of 2010 World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference, 2010: 1-4.

Research on non-grid-connected wind power daily million tons seawater desalination system using single fan

Shi Jianzhong

(Jiangsu Institute of Macroeconomic Research, Nanjing 210013, China)

[Abstract] To alleviate the current situation of our country for lack of fresh water, seawater desalination has become a major research direction. According to traditional desalination is high energy-consuming industries, and uses conventional energy, which could easily lead to secondary pollution for environment, a seawater desalination system using non-grid-connected multi-energy collaborative supply is proposed in this article. The system bases on non-grid-connected theory, wind, light, tidal and other green energy is utilized to power seawater desalination system, which can improve the efficiency of energy use and achieve zero emissions of carbon dioxide. The system possesses good social and economic benefits. This paper designs and develops a set of single blower daily million tons of seawater desalination system, using a 2.5 MW wind turbines of this system for seawater desalination and power supply system, based on the theory of non-grid-connected wind power, achieving high efficiency and low cost, full utilization.

[Key words] non-grid-connected; wind grid complementary; multi-energy collaborative; seawater desalination; frequency conversion