

doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.2011.06.012

风/光/抽蓄复合系统的建模与仿真

任 岩^{1,2}, 郑 源³, 李延频²

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 华北水利水电学院电力学院, 河南 郑州 450045; 3. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 将抽水蓄能电站与风光互补系统相结合,建立了风/光/抽蓄复合系统数学模型,其中风力发电模型采用厂家提供的特性曲线利用线性插值的方法得到,光伏发电采用 Hay 模型,对可逆式水泵水轮机的水泵工况和水轮机工况分别建模,对蓄电池建立充电和放电模型.利用 VC 2008 开发工具开发了界面友好的仿真软件,实现了对复合系统中的风力发电机输出功率、光伏阵列输出功率、可逆式水泵水轮机的水泵工况与水轮机工况的输出功率及交流直流负载的仿真.通过实例计算得知:在风力发电机和光伏阵列的总出力小于总负荷量时,可逆式水泵水轮机运行在水轮机工况,发电供给负荷;在风速最大或光照最强的几个小时内,风力发电机和光伏阵列的总出力大于总负荷量时,可逆式水泵水轮机处于抽水工况,将多余的电能以水能的形式储存起来;蓄电池一般情况下都在满容量状态,只有在瞬时负荷或负荷很大时才放电,放电后又能及时充电.

关键词: 风/光/抽蓄复合系统;抽水蓄能电站;数学模型;风光互补系统;仿真

中图分类号: S277.9; TK89 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2011)06-0518-05

Modeling and simulation of hybrid wind/PV/pumped-storage system

Ren Yan^{1,2}, Zheng Yuan³, Li Yanpin²

(1. Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Institute of Electric Power, North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450011, China; 3. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjiang, Jiangsu 210098, China)

Abstract: By combining pumped-storage power station and hybrid wind/PV system, hybrid wind/PV/pumped-storage system was established, in which wind power model was achieved by manufacturer provided linear-interpolating characteristic curve, PV modeled by Hay model, charging model and discharging model for battery as well as pump condition and turbine condition for reversible pump-turbine were modeled, respectively. Using VC 2008, an user-friendly simulation software was developed, which can simulate the output power of wind turbine, PV, reversible pump-turbine and AC/DC loads. By an example the following were achieved. Firstly, as the total power of wind and PV was less than the total loads, the reversible pump-turbine operated in turbine mode to generate power for loads. In the several hours of higher light intensity and higher wind speed, the total power of wind and PV was more than the total loads, and the reversible pump-turbine operated in pump mode to pump water to store the extra power energy in the form of water potential energy. Secondly, normally batteries were at the state of full capacity, just as loads were very instant or were very large, the batteries discharged and after discharging they could be recharged immediately.

Key words: hybrid wind/PV/pumped-storage system; pumped-storage station; mathematic model; hybrid wind/PV system; simulation

收稿日期: 2011-03-01

基金项目: 国家 863 计划项目(2009AA05Z429); 国家自然科学基金资助项目(51076041)

作者简介: 任 岩(1979—)女,河南南阳人,讲师,博士研究生(renyan@hhu.edu.cn),主要从事新能源、流体机械研究.

郑 源(1964—)男,山东日照人,教授,博士生导师(zhengyuan@hhu.edu.cn),主要从事水轮机和风力机流体机械等研究.

风能和太阳能都是新能源和可再生能源,具有永久、环保、清洁等特点,将风能和太阳能结合起来,利用风光互补发电,可获得稳定、可靠的电能^[1]。在目前的风光互补发电系统中,一般采用蓄电池蓄能^[2],但蓄电池寿命短、成本高,有污染,且不能大量储存电能。而抽水蓄能^[3-4]能够大量储存电能,且具有稳定、灵活、可靠、环保等优点^[4]。

与单一的风力发电系统、光伏发电系统和抽水蓄能系统相比,风/光/抽蓄复合系统增加了系统结构的复杂性,且运行经验非常有限。因此,有必要对系统进行深入研究。文献[5]研究了风/光复合发电系统的仿真建模,建立了系统的数学模型,并在C++ Builder环境下开发了相应的仿真软件;文献[6]对风光联合发电系统进行了建模,并利用Matlab/Simulink仿真工具对系统进行了模型仿真;文献[7]在不同的水文条件和风能条件下,开发了风电/抽水蓄能复合系统的仿真模型;文献[8]研究了风-光-抽水蓄能复合系统,对系统中不同容量的抽水蓄能电站的运行状态进行了仿真和分析;文献[9-10]对风-抽水蓄能复合系统进行了仿真。

在国内外相关研究的基础上,文中拟系统地研究风/光/抽蓄复合系统,构建复合系统,建立系统的数学模型,在VC 2008环境下建立系统仿真软件,并利用该软件进行实例计算。

1 复合系统的结构及工作原理

所建立的风/光/抽蓄复合系统的结构如图1所示。系统各部分的工作原理:①风力发电系统利用风力机将风能转换为机械能,再通过风力发电机将机械能转换为电能。②光伏发电系统利用太阳能电池板的光伏效应将光能转换为电能。③可逆式水泵水轮机有两种工况:水轮机工况和水泵工况。运行在水轮机工况时,可利用上下水库的水位差进行发电,将水能变成电能;运行在水泵工况时可进行抽水,将下水库的水抽到上水库,将电能变成水能蓄起来。可以通过控制器进行工况之间的转换。④逆变器把蓄电池中的直流电变成标准的220 V交流电,保证交流电负载设备的正常使用。同时还具有自动稳压功能,可改善系统的供电质量。⑤控制器根据日照强度、风力大小及负载的变化,不断地对蓄电池组的工作状态进行切换和调节。一方面把调整后的电能直接送往直流或交流负载;另一方面把多余的电能送往蓄电池组存储,或用于抽水蓄能系统抽水将电能变成

水能储存。发电量不能满足负载需要时,控制器把蓄电池的电能送往负载,或将可逆式水泵水轮机的运行工况调整为水轮机工况进行发电供给负载,保证了整个系统工作的连续性和稳定性。⑥蓄电池将风力发电系统和光伏发电系统输出的电能转化为化学能储存起来,以备供电不足时使用,在系统中同时起到能量调节和平衡负载两大作用,承担瞬时负荷。

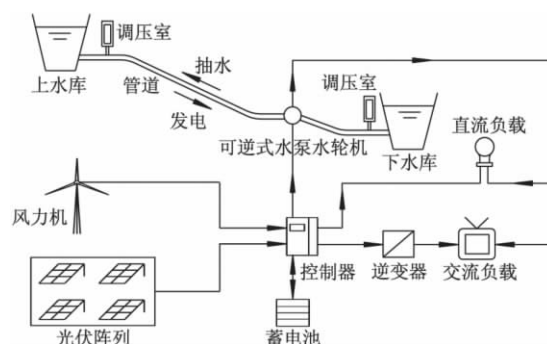


图1 风/光/抽蓄复合系统

Fig. 1 Schematic diagram of hybrid wind/PV/pumped-storage system

2 复合系统的数学模型

2.1 风力发电机的数学模型

风力发电机的输出功率取决于风力发电机转轴高度处的风速和风力发电机的输出特性。由于近地面的风速随高度按指数规律变化,在计算风力发电机的输出时,必须先把实测的平均风速折算到风力发电机转轴高度处的相应值,其转换公式为

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{h}{h_0} \right)^\alpha, \quad (1)$$

式中: v 为风力发电机转轴高度 h 处的风速; v_0 为实测高度 h_0 处的风速; α 为风速转换因子,与地面的粗糙度有关。

当风速为 v 时,风力发电机的输出功率 P_w 可按照生产厂家提供的 $P_w = f(v)$ 特性曲线来确定。如果给定的风速不在曲线点上,则可利用线性插值解决,计算公式为

$$P_w = \begin{cases} 0, & v < v_s, \\ \frac{v - v_i}{v_{i+1} - v_i} (P_{i+1} - P_i) + P_i, & v_s \leq v \leq v_p \text{ 且 } v_i \leq v \leq v_{i+1}, \\ 0, & v > v_p, \end{cases} \quad (2)$$

式中: v_s 为风力发电机的起动风速 m/s ; v_p 为风力机的截止风速 m/s ; v_i 为第 i 时刻的风速 $i = 1, 2, \dots$,

n 且 $v_s \leq v_i$ $v_{i+1} \leq v_p$; P_i 为风速功率曲线对应风速为 v_i 时风力机输出的功率 kW (风速功率曲线由风力发电机生产厂家提供, 表明在仿真时刻内平均风速所对应的风力发电机输出的平均功率)。

2.2 光伏发电的数学模型

2.2.1 光伏阵列倾斜面上的辐射量

用 Hay 模型^[11] 计算:

$$H = H_b k_b + H_d \left[\frac{H_b}{H_0} k_b + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{H_b}{H_0} \right) (1 + \cos \beta) \right] + \frac{1}{2} \rho H_h (1 - \cos \beta), \quad (3)$$

式中: H 为光伏阵列倾斜面上的总太阳辐射量, kW/m^2 ; H_b 为水平面上直接辐射量 kW/m^2 ; k_b 为倾斜面与水平面上直接辐射量之比; H_d 为水平面上散射辐射量 kW/m^2 ; H_0 为大气层外水平面上太阳辐射量 kW/m^2 ; β 为光伏阵列倾斜角, $(^\circ)$; ρ 为地面反射率, 不同地表状态的反射率可由相关书籍查到^[12]; H_h 为水平面上太阳能总辐射量 kW/m^2 。

2.2.2 光伏阵列性能模型

当光伏阵列电压为 U 时, 其对应的电流 I 为

$$I = I_{sc} [1 - C_1 (e^{\frac{U}{C_2 U_{oc}}} - 1)], \quad (4)$$

其中:
$$C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) e^{-\frac{U_m}{C_2 U_{oc}}}, \quad (5)$$

$$C_2 = \frac{\left(\frac{U_m}{U_{oc}} - 1 \right)}{\ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right)}, \quad (6)$$

式(4) ~ (6) 中: I_{sc} 为短路电流, A ; U_{oc} 为开路电压, V ; I_m , U_m 分别为最大功率点电流和电压。

考虑到太阳辐射变化和温度对输出电流和电压的影响, 光伏阵列的性能模型如下:

$$I = I_{sc} [1 - C_1 (e^{\frac{U - \Delta U}{C_2 U_{oc}}} - 1)] + \Delta I, \quad (7)$$

其中:
$$\Delta I = \mu \frac{H}{\varphi} (\theta - \theta_0) + \left(\frac{H}{\varphi} - 1 \right) \times I_{sc}, \quad (8)$$

$$\Delta U = -\tau (\theta - \theta_0) - R_c \times \Delta I, \quad (9)$$

$$\theta = \theta_0 + \lambda_c H, \quad (10)$$

式(7) ~ (10) 中: ΔI 为由于太阳辐射变化和温度对电流影响而增加的电流附加值; ΔU 为由于太阳辐射变化和温度对电压影响而增加的电压附加值; μ 为在参考日照下的电流变化温度系数, $\text{A}/^\circ\text{C}$; φ 为太阳辐射能流率参考值, 一般取为 $1 \text{ kW}/\text{m}^2$; θ 为任意太阳辐射条件下太阳能电池温度, $^\circ\text{C}$; θ_0 为太阳能电池温度参考值, 一般取为 25°C ; τ 为在参考日照下的电压变化温度系数, $\text{V}/^\circ\text{C}$; R_c 为光伏阵列的串联电

阻 Ω ; λ_c 为太阳能电池模块的温度系数。

2.3 可逆式水泵水轮机的数学模型

可逆式水泵水轮机有两个运行工况: 水泵工况 (抽水) 和水轮机工况 (发电)。

在水泵工况, 水泵水轮机轴上传递的功率^[11] 为

$$P_p = \left(\frac{\pi}{30} \right) M_{11} n_{11} D_1^2 h_r^{1.5}, \quad (11)$$

在水轮机工况, 转轮上传递的功率为

$$P_t = 9.81 Q_{11} D_1^2 h_r^{1.5}, \quad (12)$$

式中: D_1 为转轮直径, m ; h_r 为水头, m ; n_{11} 为单位转速, r/min ; Q_{11} 为单位流量, m^3/s ; M_{11} 为单位力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

2.4 蓄电池的数学模型

采用固定式铅酸蓄电池, 其数学模型如下:

蓄电池的放电模型为

$$U_b = U_s - I_b \left(\frac{0.199}{K_{bat}} + R_0 \right), \quad (13)$$

蓄电池的充电模型为

$$U_b = U_s - I_b \left(\frac{0.199}{1.142 - K_{bat}} + R_0 \right) + K_{bat} \ln(300 I_b + 1.0), \quad (14)$$

式中: U_b 为实测电压, V ; K_{bat} 为蓄电池的荷电状态, %; U_s 为蓄电池的静止电压 (与环境温度有关), V ; I_b 为放电或充电电流, A ; R_0 为蓄电池的内阻 (与环境温度有关), Ω 。

2.5 逆变器模型

逆变器的输入电流要满足交流负载的要求, 用公式表示为

$$I_{vi} = \frac{I_{1A} U_{AC}}{U_{DC} \eta_v}, \quad (15)$$

式中: I_{vi} 为逆变器的输入电流, A ; I_{1A} 为交流负载的电流, A ; U_{AC} , U_{DC} 分别为交流端电压和直流端电压, V ; η_v 为逆变器转换效率, %。

逆变器的输入功率与输出功率之间的关系为

$$P_{vi} \cdot \eta_v = P_{vo}, \quad (16)$$

式中: P_{vi} 为逆变器的输入功率, kW ; P_{vo} 为逆变器的输出功率, kW 。

3 风/光/抽蓄复合系统的仿真计算

以上述数学模型为核心, 利用 VC 2008 开发工具, 建立了界面友好的仿真软件。利用该软件进行了如下实例计算。

系统配置如下: 风力发电机 10 kW ; 光伏阵列

300 个,15 组共 400 V;抽水蓄能系统的水泵水轮机,水泵的功率为 5.5 kW,流量 $72\text{ m}^3/\text{s}$,水头 21 m,效率 75%;水轮机的功率为 4.9 kW,流量 $107\text{ m}^3/\text{s}$,水头 21 m,效率 80%;蓄电池一组共 40 个,每个容量 $100\text{ A}\cdot\text{h}$;系统额定输出交流电压为 220 V,交流负载额定功率 5 kW,直流负载最大功率 1 kW.2 月 11 日的风速 v 随时间 t 的分布见图 2;太阳辐射量 H 见图 3;风力发电机输出功率 P_w 仿真结果、光伏阵列输出功率 P_{pv} 仿真结果、可逆式水泵水轮机输出功率(水泵工况为 P_p 、水轮机工况为 P_t) 仿真结果、交流负载 P_{AC} 分布、直流负载 P_{DC} 分布见图 4;复合系统总的发电输出功率 P_{tot} 和总负荷 P_{lc} 曲线见图 5;抽水蓄能电站上水库蓄水容积 V 仿真结果见图 6;蓄电池剩余容量 E_{bat} 仿真结果见图 7.

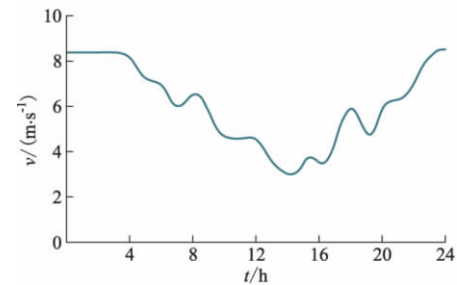


图 2 风速分布

Fig. 2 Distribution curve of wind speed

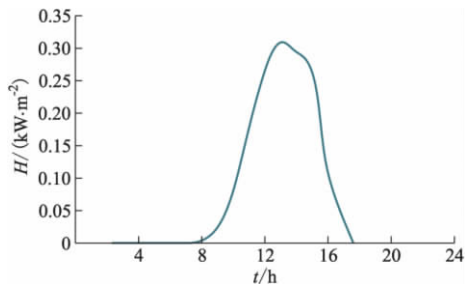


图 3 太阳辐射强度

Fig. 3 Distribution of solar radiation intensity

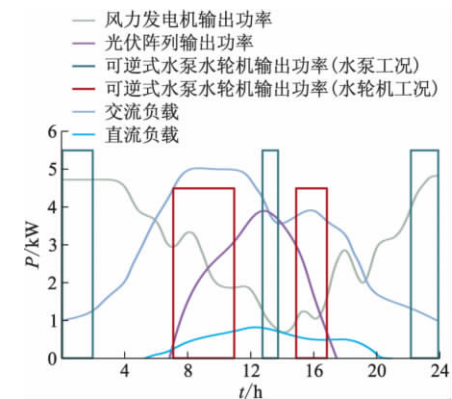


图 4 复合系统各输出功率仿真结果、交直流负载分布

Fig. 4 Output power simulations of each component of hybrid system distributions of AC loads and DC loads

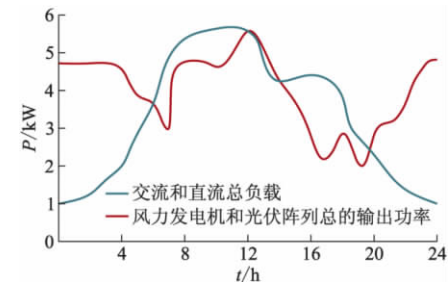


图 5 复合系统总的发电输出功率与总负荷曲线

Fig. 5 Curves of total output power of hybrid system and total loads

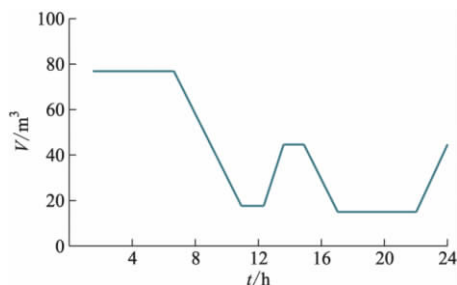


图 6 抽水蓄能电站上水库蓄水容积仿真图

Fig. 6 Simulation of upper reservoir's volume of pump-storage station

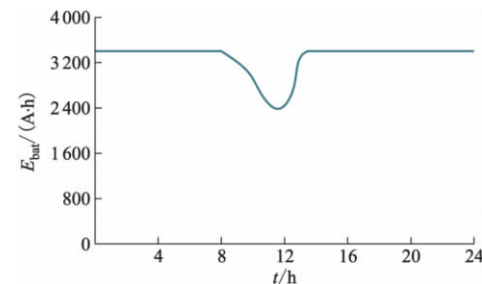


图 7 蓄电池剩余容量仿真图

Fig. 7 Simulation of charge state

由仿真结果可见:①光伏阵列只在 7:00—17:00 发电,中午功率最大;而风力发电机全天都在发电,23:00 到次日的 4:00 之间功率较大,中午功率较小.利用风光互补,可以得到较为稳定的电能.②在 5:00—8:00 和 16:00—18:30,风资源和太阳光都较小,风力发电机和光伏阵列的出力都较小,此时可逆式水泵水轮机处于水轮机工况,发电供给负荷;在 12:00 左右(光照最强)和 0:00 左右(风速最大)的几个小时内,可逆式水泵水轮机处于抽水工况,将多余的电能以水能的形式储存.由此可见,抽水蓄能电站的可逆式水泵水轮机可以在水泵工况和水轮机工况之间切换,灵活地调整系统出力和负荷之间的平衡.③蓄电池一般情况下都在满容量状态,只有在瞬时负荷或负荷很大时才放电,放电后又能及时充电,与不采用抽水蓄能的风光互补系统相

比,本系统中的蓄电池的使用寿命较长.

4 结 论

1) 风/光/抽蓄复合系统是将风光互补和抽水蓄能电站结合起来的系统,该系统能克服风能和太阳能资源的间歇性,充分利用风能和太阳能资源;同时,在风能和太阳能较小时,利用抽水蓄能电站发电供给负荷,在风能和太阳能资源丰富时,利用抽水蓄能抽水,将多余电能转换成水能储存,调整了风光互补发电与负荷之间的平衡.

2) 试验是以冬季的一天为例,得出的结论对冬季有一定的普适性.而对于夏季,由于负荷特性与冬季的不尽相同,所以得出的结论也有一定的不同.

3) 利用文中提出的数学模型和仿真软件,可以对风/光/抽蓄复合系统进行计算机仿真计算,从而能够预测系统的性能.例如,风力发电机的功率、光伏阵列的功率、可逆式水泵水轮机的出力、系统出力与负荷之间的匹配情况,系统调度的合理性等.利用该仿真软件可以对系统进行长期的仿真计算,从而对预测系统性能、系统优化等都有很重要的意义.

4) 在风/光/抽蓄复合系统建模与仿真的基础上,可以进一步研究复合系统的功率预测、优化调度等.

参考文献(References)

- [1] Nema P, Nema R K, Rangnekar S. A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009, 13(8): 2096 – 2103.
- [2] Kaldellis J K, Zafirakis D. Optimum energy storage techniques for the improvement of renewable energy sources-based electricity generation economic efficiency [J]. *Energy* 2007, 32(12): 2295 – 2305.
- [3] 梅祖彦. 抽水蓄能发电技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [4] 程伟平, 胡云进, 章军军, 等. 竖井式抽水蓄能电站进/出水口的水力特征 [J]. *排灌机械工程学报*, 2010, 28(6): 537 – 542.
Cheng Weiping, Hu Yunjin, Zhang Junjun, et al. Study on hydraulic characteristics of vertical pipe inlet/outlet of pumped storage plants [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2010, 28(6): 537 – 542. (in Chinese)
- [5] Manolakos D, Papadakis G, Papantonis D, et al. A simulation-optimisation programme for designing hybrid energy systems for supplying electricity and fresh water through desalination to remote areas case study: the Mersini village, Donoussa island, Aegean Sea, Greece [J]. *Energy* 2001, 26(7): 679 – 704.
- [6] 茆美琴, 余世杰, 苏建徽, 等. 风/光复合发电系统变结构仿真建模研究 [J]. *系统仿真学报* 2003, 15(3): 361 – 364.
Mao Meiqin, Yu Shijie, Su Jianhui, et al. Research on variable structure simulation modeling for wind-solar hybrid power systems [J]. *Journal of System Simulation*, 2003, 15(3): 361 – 364. (in Chinese)
- [7] 陈 丽. 风光联合发电系统建模与设计 [D]. 长沙: 长沙理工大学电气学院, 2010.
- [8] Papaefthymiou S V, Karamanou E G, Papathanassiou S A, et al. A wind-hydro-pumped storage station leading to high RES penetration in the autonomous island system of Ikaria [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2010, 1(3): 163 – 172.
- [9] Chen G Z, Liu D Y, Wang F, et al. Determination of installed capacity of Pumped Storage Station in WSP hybrid power supply system [C] // *1st International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, Surpergen 2009.
- [10] Anagnostopoulos J S, Papantonis D E. Simulation and size optimization of a pumped-storage power plant for the recovery of wind-farms rejected energy [J]. *Renewable Energy* 2008, 33(7): 1685 – 1694.
- [11] 杨金焕, 毛家俊, 陈中华. 不同方位倾斜面上太阳辐射量及最佳倾角的计算 [J]. *上海交通大学学报*, 2002, 36(7): 1032 – 1036.
Yang Jinhuan, Mao Jiajun, Chen Zhonghua. Calculation of solar radiation on variously oriented tilted surface and optimum tilt angle [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University* 2002, 36(7): 1032 – 1036. (in Chinese)
- [12] 李安定. 太阳能光伏发电系统工程 [M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2001.

(责任编辑 张文涛)