

Optimal Selection for Parameters of Wind Powered Pumped Hydro Storage Systems

Yuehua Huang, Xingchen Zhou, Yang Xu

China Three Gorges University, Electrical Engineering and Renewable Energy School, Yichang Hubei, China, 443002

E-mail: starzhou2005@163.com

Abstract: A small-size simulation grid is set up for wind powered pumped hydro storage systems in island grids. And a joint operation scheme is prepared for the systems. Then a mathematical analysis model is established under this scheme. The calculation shows that wind powered pumped hydro storage systems are effective ways to maximum use wind power, compared to the normal wind farm. Curves, which show the impacts of parameters of pumps and turbines, reservoir capacity within the joint systems consisting of a 4.8MW wind farm, are drawn to optimally select these three parameters. Thus a simplified example of joint systems in other conditions is provided.

Keywords: Wind powered pumped hydro storage systems; wind farm; parameters; optimal selection

风电抽水蓄能联合系统参数的优化选择

黄悦华, 周星辰, 徐 阳

三峡大学, 电气与新能源学院, 湖北宜昌, 中国, 443002

E-mail: starzhou2005@163.com

摘 要: 针对孤岛电网, 构建了一个含有风电抽水蓄能联合运行系统的小型模拟电网, 并对其拟定了一种联合运行方案, 然后在该方案下建立数学分析模型, 通过对该联合系统与普通风电系统的比较计算分析, 证明了风电抽水蓄能联合系统是最大化利用风能的有效途径。文章着重通过绘制在该方案下一个含有 4.8MW 风电场的联合系统中的抽水泵和水轮机的参数、水库容量对输出电量影响的曲线, 来选择这三个参数的最优值, 为其他条件下联合系统参数的优化选择提供了一个简明的示例。

关键词: 风电抽水蓄能联合系统; 风电场; 系统参数; 优化选择

1 引言

作为一种可再生的自然资源, 风力发电在世界各地得到了广泛关注和快速的发展^[1]。但是, 由于风能资源是一种无法准确预测、无法存储、无法调度的间歇性能源, 不断变化的风速使得风电输出不断波动, 因此电网中风电比重的上升会使电网调峰、调频的压力随之增大^[2]。对此, 一种有效的解决方法就是用蓄能方式将风电储存起来, 这样就可以稳定地为电网供电。现有的风电蓄能技术包括: 水力蓄能、压缩空气蓄能、超导磁体蓄能、流体电池组、电解水制氢等^[3], 目前只有抽水蓄能具有大规模蓄能的经济和技术可行性。

抽水蓄能电站具有以下优越性^[4]: 对电网负荷变化的反应迅速、调节灵活, 调峰、填谷、调频、调相和事故备用的运行性能好。因此, 风电抽水蓄能联合

运行系统就可以将过大比重的风电转换成高质量的电能, 间接输入电网, 这样就保证了风能资源得到最大化的开发利用。

风电抽水蓄能联合运行系统由于同时涉及到风电、水电和电力系统等多种因素, 研究难度很大, 目前一般研究的是孤岛电网或小型电力系统中的联合系统。文献[5]对风水电联合系统的技术和经济性进行了分析, 文献[6]对联合系统进行了优化, 文献[7]针对爱琴海岛屿上的电网设计并优化风水电联合系统。

本文在针对孤岛电网的风水电联合系统所拟定的运行方案的基础上进行计算分析, 比较该联合系统和普通风电系统的输出电量, 并绘制抽水泵和水轮机的参数、水库容量对整个联合系统输出电量影响的曲线, 对它们进行优化选择。文章主要是为在其他条件下对联合系统的参数优化选择提供一个示例。

2 联合系统的运行方案及计算分析模型

本文中所使用的运行方案是根据风电场穿透功率极限来拟定的，风电场穿透功率极限就是某个电力系统可以接受的最大风电容量^[8]。具体表达为：如果风电场的风能超过了穿透功率极限，就开启水泵，通过将下水库的水抽到上水库来储存超过部分的风能；如果风电场能利用的风能低于穿透功率极限，就开启水轮机发电，将原先储存的风能转化为电能。电网中的热电站一直为联合系统的输出功率保持充足的热备用。

为了验证在该方案下运行的联合系统的优越性，将建立一个模拟电网，然后在该方案下建立数学分析模型来计算该电网中的联合系统的年发电量，使其与普通风电系统作比较。

图 1 所示的就是在孤岛电网中的一个含有“风电抽水蓄能联合运行系统”的模拟电网，该联合系统包括：一个风电场；一个由几个水泵组成的水泵站，用来将水从下水库抽到上水库；一个由几个水轮机组成的水电站，用来发电；两个水库，并且这两个水库间有一定的高度差。风电场和水轮机所发出的电量直接传输到电网上，该电网还有一座热电站参与供电，该热电站必须随时都能够承担整个电网的负荷。

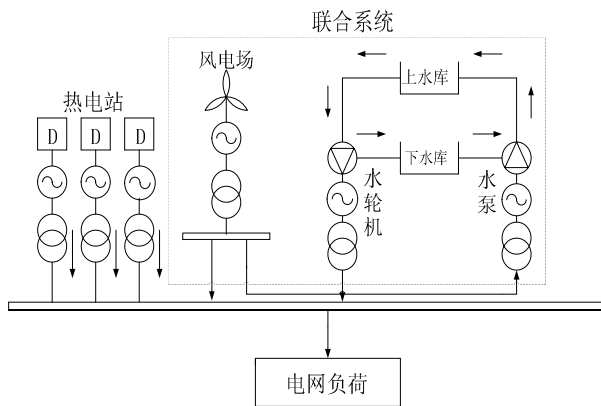


Figure 1. Simulation grid consisting of wind powered pumped hydro storage systems

图 1. 含“风电抽水蓄能联合运行系统”的模拟电网

在该联合系统运行之前首先要确定的是风电穿透功率极限，其计算公式是：

$$P_{HS} \leq P_L - P_{TPmin} \quad (1)$$

$$P_{HS} \leq p_{max} \cdot P_{TPn} \quad (2)$$

式中： P_{HS} 、 P_L 、 P_{TPmin} 分别是联合系统的输出功率、电网负荷需求、热电站的最小功率； p_{max} 、 P_{TPn} 分别是该联合系统的穿透功率极限和热电站的额定输出功率。

模拟电网中用来抽水的水泵的功率计算公式：

$$P_{pump} = \frac{r \cdot g \cdot Q \cdot (H + h_f)}{1000 \cdot h_{pump} \cdot h_{el}} \quad (3)$$

模拟电网中用来发电的水轮机的功率计算公式：

$$P_{turbine} = \frac{r \cdot g \cdot Q \cdot (H - h_f)}{1000} \cdot h_{turbine} \cdot h_{el} \quad (4)$$

式中： P_{pump} 是水泵消耗的功率，kW； r 是水的密度， $r = 1000 \text{ kg/m}^3$ ； Q 是水流量， m^3/s ； H 是水头， m ； h_f 是管中的水头损失， $h_f = k \cdot Q^2$ ， m ； h_{pump} 是水泵效率； h_{el} 是电机效率； $P_{turbine}$ 是水轮机发出的功率，kW； $h_{turbine}$ 是水轮机效率。

对于电网中的风电场，它的总出力是^[9]：

$$P_{wf} = \sum_{i=1}^n P_{wt_i} \cdot x_j \quad (5)$$

式中： n 是风电场中正常运行的风机台数； x 、 j 分别是风机尾流衰减系数和风电场效率； P_{wt_i} 是风电场中单台风机的风轮功率，其值可以根据风速 v 由风机的风轮功率风速曲线来插值求出。

因此，模拟电网中的整个联合系统的总出力就是：

$$P_{total} = P_{turbine} + P_{wf} \quad (6)$$

3 计算结果及其分析

对于图 1 所示的模拟电网，设其水泵站是由 2~10 个固定转速或可变转速的水泵组成的，每个水泵的额定功率是 480kW。水电站是由 1~6 个培尔顿水轮机组成的，每个水轮机的额定输出功率是 1000kW。水头取为 300m，上下水库的高度差是 1500m，电机效率是 90%，同时在计算中使用典型水泵和水轮机的效率曲线，设定水库的容量可以使水泵在额定功率下工作 48~96 小时。电网中热电站的总装机容量设为 24MW，风电场中的风机类型则设定为 800kW 的变浆风机。

计算过程中要使用电网的负荷需求和风速，图 2、3 分别显示了一个典型的中等大小的孤岛电网在一年

中的负荷需求和风电场一年中风速的具体变化情况。

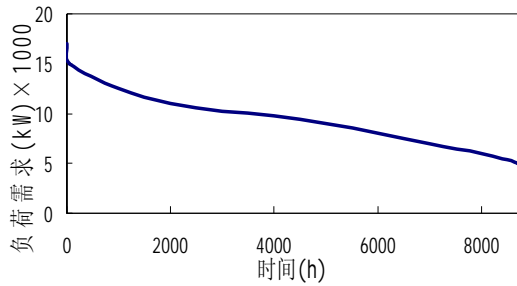


Figure 2. Annual load demand of island grids
图 2. 孤岛电网一年中的负荷需求

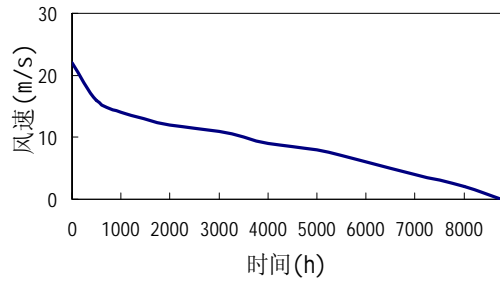


Figure 3. Annual wind speed time series
图 3. 风电场一年中风速的变化

在联合系统开始运行前，先利用公式(1)、(2)来计算风电穿透功率极限，其结果如图 4 所示：

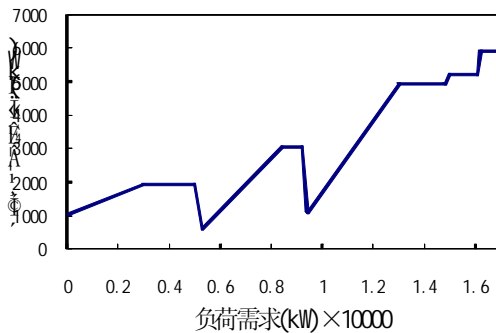


Figure 4. Wind penetration limit
图 4. 风电穿透功率极限

根据图 4 中显示的风电穿透功率极限和图 3 中显示的风电场中风能的具体情况，就可以使该联合系统在所描述的方案下运行了。利用上面提供的数据，并结合公式(3)~(6)来计算出联合系统的年总发电量。如果一个联合系统的规模足够大，可以忽略水泵、水轮

机、水库容量这些系统部件的参数对系统出力的影响，即在理想状态下，联合系统的年总发电量如图 5 所示：

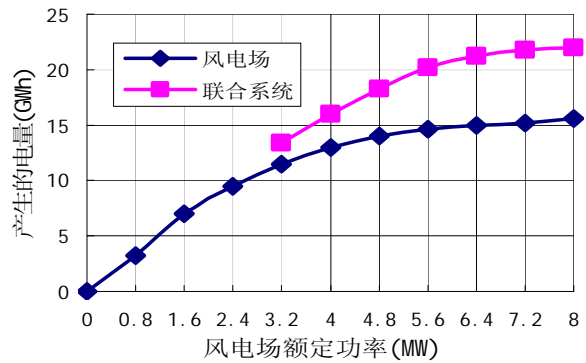


Figure 5. Energy produced by wind and hybrid station
图 5. 风电场和联合系统产生的电量

从上图可以看出，风电抽水蓄能联合系统明显地提高了对风能的利用，大大地增加了输出电量。

在现场运行过程中，水泵、水轮机、水库容量这些联合系统部件的参数对系统出力影响很大。本部分将以一个含有 4.8MW 风电场的联合系统为例，通过计算来绘制系统部件参数对整个系统年发电量影响的曲线，并确定这些参数的最优化取值。

图 6 所示的是水轮机的数量对系统年发电量的影响。从图中可以看出，相对于同一容量的风电场，随着水轮机数量的增加，系统年发电量也随之增大。对于 4.8MW 的风电场，除了 1x1000 这条曲线外，其余各曲线上的点对应 Y 轴的值（系统年发电量）很接近，考虑到经济性，水轮机选择 2x1000kW。

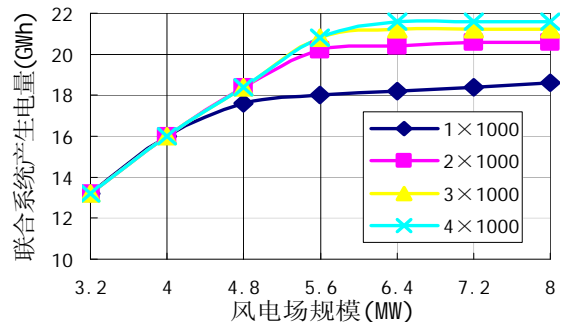


Figure 6. Impact of number of turbines
图 6. 水轮机数量对系统年发电量的影响

图 7 所示的是水泵的参数对系统年发电量的影响。同样的，从图中可以看出，增加水泵的数量会增

加系统年发电量，并且同数量的可变转速水泵比固定转速水泵增加系统发电量多。对于 4.8MW 的风电场，6VS 这条曲线上的点对应 Y 轴的值已经趋近于最大值，因此选择 6 个可变转速水泵。

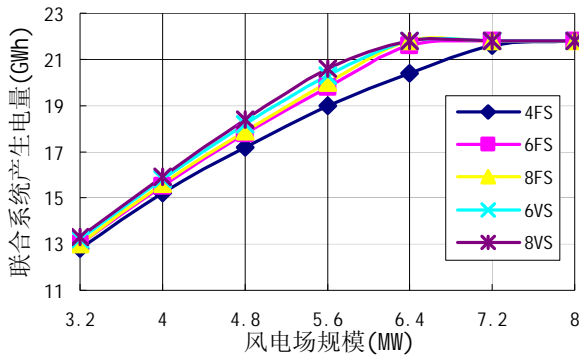


Figure 7. Impact of parameters of pumps (FS: fixed speed, VS: variable speed)

图 7. 水泵参数对系统年发电量的影响 (其中 FS: 固定转速, VS: 可变转速)

图 8 所示的是水库容量对系统年发电量的影响。观察曲线的趋势，可以发现随着水库容量的增大，年发电量也不断增加，当水库容量达到 $165 \times 1000m^3$ 的时候，年发电量趋近于最大值，因此水库容量选择 $165 \times 1000m^3$ 。

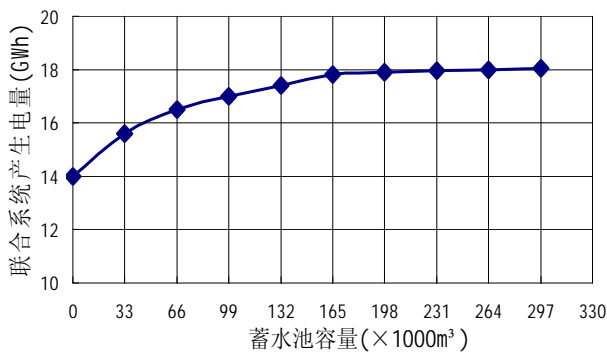


Figure 8. Impact of reservoir capacity
图 8. 水库容量对系统年发电量的影响

4 结论

本文通过计算，从理论上证实了风电抽水蓄能联

合运行系统在提高风能利用率上的优越性。并且研究了联合系统中的水泵、水轮机的参数和水库容量对系统年发电量的影响，通过观察影响曲线，成功确定了在保证经济性、高效率的前提下，一个含有 4.8MW 风电场的联合系统的上述参数的最优化的取值。为其他研究人员确定联合系统参数的最优值提供了一个详细的示例。

实际的风电抽水蓄能联合运行系统是复杂且多变的，本文只是就孤岛电网进行了研究，一旦接入大型电网，研究的难度就会加大很多。同时，出于经济性考虑，整个联合系统的造价、上网电价等等都必须纳入研究的范畴。所以，对风电抽水蓄能联合运行系统的研究还有很长的一段路要走。

References(参考文献)

- [1] Kenisarin Murat, Karsli Vedat M, Caglar Mehmet, Wind power engineering in the world and perspectives of its development in Turkey[J], Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2006, 10(4): 341-369.
- [2] Liu Deyou, Tan Zhizhong, Wang Feng, Simulation of wind powered pumped hydro storage systems[J], Water Resources and Power, 2006, 24(6): 39-42(Ch).
刘德有, 谭志忠, 王丰, 风电-抽水蓄能联合运行系统的模拟研究[J], 水电能源科学, 2006, 24(6): 39-42.
- [3] Castronuovo E D, Lopes J A P, On the optimization of the daily operation of a wind-hydro power plant[J], IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1599-1606.
- [4] Lu Youmei, Pan Jiazheng, Pumped Storage Power Station[M], Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1991, P28-75 (Ch).
陆佑楣, 潘家铮, 抽水蓄能电站[M], 北京: 水利电力出版社, 1991, P28-75.
- [5] C. Bueno, J. A. Carta, Technical economic analysis of wind-powered pumped hydrostorage systems, Solar Energy, 2005, 78: 382-395.
- [6] J. S. Anagnostopoulos, D. E. Papantonis, Simulation and size optimization of a pumped-storage power plant for the recovery of wind-farms rejected energy, Renewable Energy, 2008, 33: 1685-1694.
- [7] Kaldellis J. K, Kavadias K. A, Optimal wind-hydro solution for Aegean sea islands' electricity-demand fulfillment[J], Applied Energy, 2001, 70(4): 333-354.
- [8] Falck C. Methods and models for evaluating the impact of decentralized generation[C], Cigre, 1998: 38-301.
- [9] C. Bueno, J. A. Carta, Wind powered pumped hydro storage systems, a means of increasing the penetration of renewable energy in the Canary Islands[J], Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2006, 10(4): 312-340.