

# 风电-抽水蓄能联合系统的优化运行模型

谭志忠 刘德有 欧传奇 王 丰

( 河海大学水利水电工程学院 ,江苏 南京 210098 )

摘要 拟定了风电-抽水蓄能联合系统 3 种可行的运行方案 :全部风电供给抽水蓄能电站抽水 ,根据电网容量和风电场出力情况 ,部分风电直接输入电网 ,其余风电供给抽水蓄能电站抽水 ;风电全部直接输入电网 .建立了风电-抽水蓄能联合系统的优化运行模型 ,计算得出了常规发电厂稳定运行的最小容量以及含一定容量风电的电网所需的抽水蓄能电站装机容量 ,建立了经济评价模型 ,根据综合经济评价结果 ,优选出了风电-抽水蓄能联合系统的最佳运行方案 .

关键词 :风电-抽水蓄能联合系统 联合运行 运行模型 经济评价

中图分类号 :TM614 文献标识码 :A 文章编号 :1000-198X( 2008 )01-0058-05

由于风能安全清洁 ,资源丰富 ,近年来风力发电在各国得到了广泛关注和快速发展 .但当直接输入电网的风电占所在电网的比重超过 10% 时 ,必须对电网系统进行合理有效的调节 ,以提高供电质量和降低运行成本<sup>[1-2]</sup> .对此 ,欧洲部分国家已做了不少探索性研究 ,并提出了用蓄能方式将风电蓄存起来 ,在电网需要时稳定地为电网供电的设想 .风电-氢系统<sup>[3]</sup>虽然是一种比较理想的蓄能发电方式 ,但目前技术尚不成熟 ,造价高 ,还不能大规模采用 ;风电-柴油机系统<sup>[4]</sup>需采用大量的化石燃料 ,不是理想的蓄能发电方式 ;基于生物量( biomass-based )<sup>[5]</sup>的蓄能发电方式具有很好的发展前景 ,但目前成本相当高 .因抽水蓄能电站具有对电网负荷变化反应快速、调节灵活 ,调峰、填谷、调频、调相和事故备用的运行性能好的优越性 ,所以风电-抽水蓄能联合系统得到了成功应用<sup>[2]</sup> .文献 [6] 给出了风电-抽水蓄能联合系统的 6 种不同运行方案以及各子系统的运行模型及经济评价模型 ,但考虑用火电来调峰运行 ,对整个电网来说不是最经济的 ;文献 [7] 通过基荷、峰荷比例的调整来优化系统 ,风电全部用来抽水 ,基荷由常规能源满足 ,峰荷由抽水蓄能电站提供 ,但该文献没有优选风电-抽水蓄能联合系统运行方案 ;文献 [8] 用线性规划方法求得了抽水蓄能电站在一定约束条件下的抽水或发电容量 ,实现了风电-抽水蓄能联合系统效益的最大化 .

本文在拟定风电-抽水蓄能联合系统 3 种可行运行方案的基础上 ,通过综合经济指标的比较优选出了最佳运行方案 ,并求出了含一定容量风电的电网所需的抽水蓄能电站装机容量 .

## 1 联合系统的运行方案及其数学模型

图 1 所示的是一个含风电-抽水蓄能联合系统的小型电网系统模型 ,为保证该电网的正常运行 ,必须满足其所有供电容量  $P_{total}$  与所有负荷容量  $D_{total}$  的供需平衡 ,即  $P_{total} = D_{total}$ <sup>[2]</sup> .

设风电-抽水蓄能联合系统的优化运行目标是 :在优先利用风电和抽水蓄能电站发电满足负荷的情况下 ,常规发电厂以最小的容量稳定运行 .即

$$P_{CPS} = \min \{ D_{LS} ]_{base} + \beta [ D_{LS} ]_{max} ]_{in} \} \quad (1)$$

式中 : $P_{CPS}$ ——常规电厂的稳定出力 ; $\beta$ ——常规电厂承担最大腰荷的比例 ; $[ D_{LS} ]_{max} ]_{in}$ ——电网系统负荷的最大腰荷 ; $D_{LS}$ ——系统负荷 ,包括基荷  $[ D_{LS} ]_{base}$ 、腰荷  $[ D_{LS} ]_{in}$  和峰荷  $[ D_{LS} ]_{peak}$  .

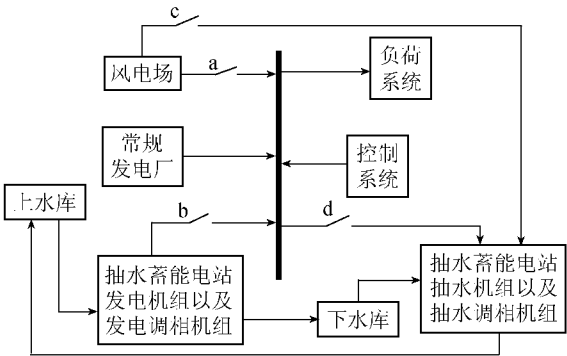


图 1 含风电-抽水蓄能系统的电网系统模型  
Fig.1 Grid with wind-powered pumped storage system

### 1.1 运行方案 1

如图 1 所示,开关 a 打开,开关 c 关闭;当用抽水蓄能电站来满足负荷时,闭合开关 b;系统负荷低谷时期,常规电厂有剩余电能时,闭合开关 d.所有风电用来抽水,负荷低谷时常规电厂的剩余电量也用来抽水,抽水蓄能电站承担常规电厂供电以外的系统负荷.该方案的数学模型为

$$D_{PS} = P_{WF} + [P_{CPS} - D_{LS}] \quad P_{HP} = 0 \quad (D_{LS} \leq P_{CPS}) \quad (2)$$

$$D_{PS} = P_{WF} \quad P_{HP} = [D_{LS}]_{peak} + (1 - \beta) [D_{LS max}]_m \quad (D_{LS} > P_{CPS}) \quad (3)$$

式中: $P_{WF}$ ——风电场总出力; $P_{HP}$ ——抽水蓄能电站的发电运行容量; $D_{PS}$ ——抽水蓄能电站的抽水总功率.

式(2)(3)的优化计算过程是:首先假设一个  $\beta$  初值,根据风电出力变化求出各时段抽水蓄能电站的抽水和发电运行容量,然后根据上水库水位的变化反复迭代  $\beta$ ,直到  $\beta$  为最优值.

$\beta$  最优的判别条件为:在抽水蓄能电站上水库蓄放水的一个优化运行周期末时,上水库水位正好到达最低发电水位,即没有多余的水量蓄存.

### 1.2 运行方案 2

如图 1 所示,开关 a 关闭;当用抽水蓄能电站来满足负荷时,关闭开关 b;负荷低谷时期,电网有剩余电能时,闭合开关 d.当风电出力小于或等于  $\alpha [D_{LS max}]_{p-m}$  ( $[D_{LS max}]_{p-m}$  表示系统负荷的最大峰谷差; $\alpha$  是允许直接输入电网的最大风电比重)时,将全部风电直接输入电网,即式(4),打开开关 c;当风电出力大于  $\alpha [D_{LS max}]_{p-m}$  时,将  $\alpha [D_{LS max}]_{p-m}$  的风电直接输入电网,大于  $\alpha [D_{LS max}]_{p-m}$  的部分供给抽水蓄能电站抽水,即式(5),闭合开关 c.系统负荷高峰时,风电和抽水蓄能电站共同满足系统负荷,并优先采用风电;负荷低谷时,多余的风电和常规电厂电量均用来抽水.即

$$\begin{cases} D_{PS} = P_{CPS} + P_{WF} - D_{LS} & P_{HP} = 0 & (D_{LS} - P_{CPS} - P_{WF} \leq 0, P_{WF} \leq \alpha [D_{LS max}]_{p-m}) \\ P_{HP} = D_{LS} - P_{CPS} - P_{WF} & D_{PS} = 0 & (D_{LS} - P_{CPS} - P_{WF} > 0, P_{WF} \leq \alpha [D_{LS max}]_{p-m}) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} D_{PS} = P_{CPS} + P_{WF} - D_{LS} & P_{HP} = 0 & (D_{LS} - P_{CPS} - \alpha [D_{LS max}]_{p-m} \leq 0, P_{WF} > \alpha [D_{LS max}]_{p-m}) \\ P_{HP} = D_{LS} - P_{CPS} - \alpha [D_{LS max}]_{p-m} & D_{PS} = P_{WF} - \alpha [D_{LS max}]_{p-m} & (D_{LS} - P_{CPS} - \alpha [D_{LS max}]_{p-m} > 0, P_{WF} > \alpha [D_{LS max}]_{p-m}) \end{cases} \quad (5)$$

式(4)(5)的优化计算过程类同于式(2)(3).

### 1.3 运行方案 3

如图 1 所示,开关 a 关闭,开关 c 打开;当用抽水蓄能电站来满足负荷或作调相、调频运行时,开关 b 闭合;负荷低谷时期,电网有剩余电能时,开关 d 闭合.所有风电直接输入电网,抽水蓄能电站的部分机组作调相、调频运行,确保电网系统在大比重风电输入的情况下,不产生过大的电压和频率波动.负荷高峰时期,抽水蓄能电站承担风电和常规电厂供电以外的系统负荷;负荷低谷时,抽水蓄能电站利用多余的风电和常规电厂电量抽水.即

$$\begin{cases} D_{PS} = P_{CPS} + P_{WF} - D_{LS} & P_{HP} = 0 & (D_{LS} - P_{CPS} - P_{WF} \leq 0) \\ P_{HP} = D_{LS} - P_{CPS} - P_{WF} & D_{PS} = 0 & (D_{LS} - P_{CPS} - P_{WF} > 0) \end{cases} \quad (6)$$

该方案中抽水蓄能电站的调频、调相任务较重,需要考虑调频、调相容量,其大小可以根据风电场风机潮流计算结果确定.抽水蓄能机组做调相运行相当于同步调相机,在满负荷运行时,其消耗有功功率约为额定容量的 1.5% ~ 5%.

## 2 方案分析数学模型及其运算程序

### 2.1 风电场相关计算模型

风电场在  $t$  时刻的总出力为<sup>[6-7]</sup>

$$P_{WF} = \sum_{i=1}^{n_w} P_{WT_i} \xi_i \varphi \quad (7)$$

式中: $n_w$ —— $t$  时刻风电场中正常运行的风机台数; $\xi_i$ ——风机的尾流衰减系数和风电场效率; $P_{WT_i}$ —— $t$  时刻单台风机的风轮功率,其值可根据风速  $v$  由风机的风轮功率风速曲线插值求出.

大型并网风电场大都采用异步风力发电机组,并网时风电机组需要吸收大量的无功功率.文献 9 提出了异步风电机组的潮流计算模型,并计算了风电机组从电网吸收的无功功率的大小.文献 10 改进了含大型风电场电网潮流的优化计算方法,给出了异步风力发电机的无功电压特性方程

$$Q_W = f(V_W) = -\frac{V_W^2}{\chi_m} + \frac{-V_W^2 + \sqrt{V_W^4 - 4P_{WT}x}}{2x}$$
 (8)

式中： $Q_W$ ——风机从电网吸收的无功功率； $V_W$ ——机端电压； $\chi_m$ ——激磁电抗； $x$ ——定子漏抗与转子漏抗之和； $P_{WT}$ ——风机有功出力。

2.2 抽水蓄能电站相关计算模型

抽水蓄能电站的发电和抽水流量特性可以用式(9)表示：

$$Q = Q(P, H)$$
 (9)

式中： $H$ ——抽水蓄能电站的水头或扬程，可根据上水库的蓄水量(库容)-水位曲线求出； $P$ ——抽水蓄能电站的出力或功率。上水库在  $t$  时刻的蓄水量  $V$  可由上一计算时步的蓄水量  $V(t-\Delta t)$  该计算时步的抽水量和泄水量逐时步迭代求出。在任意  $t$  时刻，必须满足  $V \geq V_{\min}$ ，其中  $V_{\min}$  为上水库最低发电水位时的蓄水量<sup>[2]</sup>。

2.3 经济评价分析模型

风电-抽水蓄能系统折算到优化时段内的单位  $\text{kW}\cdot\text{h}$  电能投资成本为<sup>[6-7]</sup>

$$C_L = \frac{(C_{I0} - S_0)[1 - (1 + r)^{-L}] + C_{O\&M} + C_{EXT}}{\int_0^T [D_{LS}]_{peak} + [D_{LS}]_m - \beta [D_{LS}]_{max}] dt \times 8760/T}$$
 (10)

式中： $C_{I0}$ ——风电-抽水蓄能联合系统的投资成本； $S_0$ ——政府对风电的补贴； $r$ ——折扣率； $L$ ——回收年限； $C_{O\&M}$ ——年运行维护费用； $C_{EXT}$ ——其他额外支出； $T$ ——优化时段(以  $\text{h}$  为单位的计算历时)。

风电-抽水蓄能联合系统的电能收益为风电场和抽水蓄能电站的发电收益扣除抽水消耗，它在优化时段内的单位  $\text{kW}\cdot\text{h}$  电能收益  $B_f$  的计算公式为

$$B_f = \frac{\int_0^T [P_{WF} + P_{HP} - D_{PS}] B dt}{\int_0^T [D_{LS}]_{peak} + [D_{LS}]_m - \beta [D_{LS}]_{max}] dt}$$
 (11)

式中  $B$  为时刻  $t$  的电价。

风电-抽水蓄能联合系统是具有调峰填谷等优越性能的清洁能源发电系统，根据等效火电替代方案法，可导出风电-抽水蓄能联合系统在优化时段内的单位  $\text{kW}\cdot\text{h}$  电能的节煤效益  $B_r$  的计算模型：

$$B_r = \frac{\int_0^T [D_{LS}]_{peak}(1 + p_{tp})k_p + [D_{LS}]_m(1 + p_{tm})k_m - \beta [D_{LS}]_{max}(1 + p_{tb})k_b] dt C_c}{\int_0^T [D_{LS}]_{peak} + [D_{LS}]_m - \beta [D_{LS}]_{max}] dt}$$
 (12)

式中： $p_{tp}$ 、 $p_{tm}$ 、 $p_{tb}$ ——火电厂承担峰荷、腰荷、基荷时的单位煤耗； $k_p$ 、 $k_m$ 、 $k_b$ ——火电厂承担峰荷、腰荷、基荷时的厂用电率； $C_c$ ——每吨标准煤的成本。

综合经济指标  $S_t$  由式(13)给出：

$$S_t = B_r + B_f - C_L$$
 (13)

2.4 运算程序

各运行方案优化计算的程序流程如图 2 所示，步骤为 (a) 获取基本数据，如系统负荷特性，风速变化曲线，上水库水位-库容曲线、最小蓄水量以及与经济评价相关的参数等。(b) 确定最优  $\beta$ 。(c) 选择最佳运行方案，选择综合经济指标  $S_t$  最大的方案作为最优运行方案。

3 算例分析

本文算例中图 3~5 的资料均取自文献[7]。其他基本参数：风机尾流衰减系数为 0.95，风电场效率为 0.85，抽水蓄能电站  $\eta_H = 0.92$ ， $\eta_P = 0.81$ ，水头(扬程)取为 100 m；上水库  $V_{\min} = 50 \text{ 万 m}^3$ ，它在优化时段末

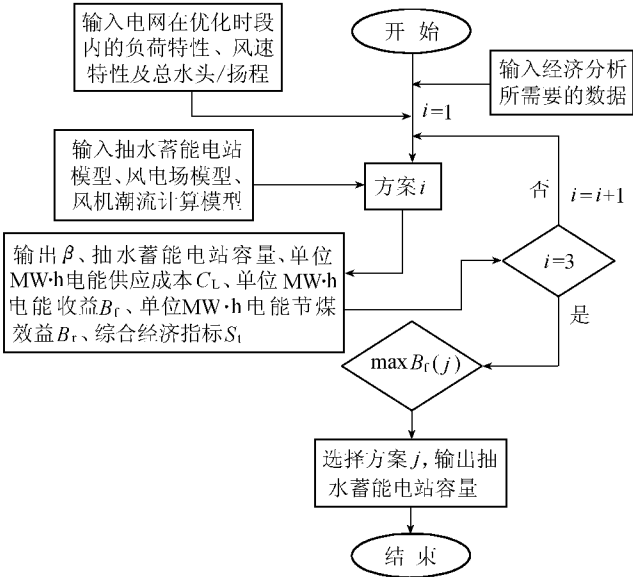


图 2 程序设计框图

Fig.2 Block diagram for program design

的允许余量为  $1.8V_{\min}$ ;风电场静态投资为 8000 元/kW(国家给风电的各种补贴为 0.5 元/(kW·h));抽水蓄能电站静态投资为 3700 元/kW;风电-抽水蓄能联合系统的年运行费率为 0.025,其他额外支出取年运行费的 0.15,投资回收期为 20 a,折扣率为 0.07%;峰谷电价差,22:00~8:00 电价为 0.25 元/(kW·h),8:00~22:00 电价为 0.6 元/(kW·h);火电厂峰荷、腰荷、基荷运行时的煤耗分别为 0.4 kg/(kW·h)、0.35 kg/(kW·h)、0.32 kg/(kW·h),对应的厂用电率分别为 9%、7.5%、6%,标准煤成本为 300 元/t.

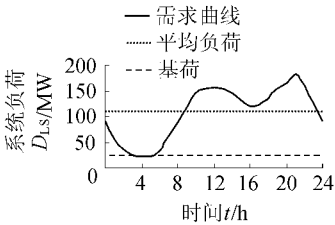


图 3 电网的年最大日负荷特性

Fig.3 Daily curve of annual maximum load of power grid

将图 4 中 2 种不同的风速日变化情况对应分为 2 个算例,每个算例又有不同台数风机 2 种情况(情况 1 风机 100 台,情况 2 风机 45 台,每台功率为 850 kW).如果其他基本资料均相同,则针对上述 2 个算例的 2 种情况分别进行本文 3 种运行方案的优化计算,即可得表 1 和图 6 的计算结果.

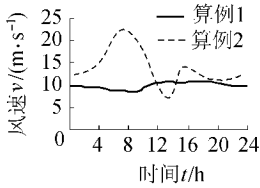


图 4 风速日变化曲线

Fig.4 Daily curve of wind velocity

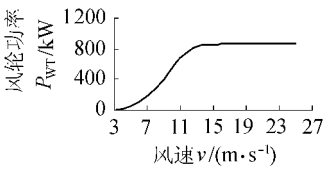


图 5 850 kW 风机的风轮功率-风速曲线  
Fig.5 Rotate power-wind velocity curve  
for wind turbine of 850kW

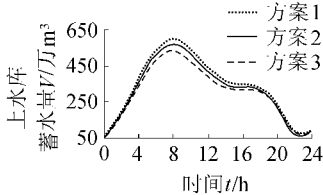


图 6 上水库蓄水量变化曲线(算例 1,情况 1)  
Fig.6 Daily curve of volume of water storage  
in upper reservoir

由表 1 中的算例 1 结果可见:方案 1 的风电全部用来抽水,风电对电网的稳定运行不造成影响,但在考虑峰谷电价差的情况下,抽水费用较高,故综合经济指标相对较低.方案 2 的风电尽可能直接输入电网,超过  $0.1[D_{LS\max}]_{\min}$  的部分用来抽水,因直接输入电网的风电较多,电量收益明显增加,节煤收益也增加,抽水蓄能电站的装机容量减小,所以综合经济指标优于方案 1.但如果在高电价时段的风电场出力较大,则其抽水成本将影响其综合经济指标.方案 3 的风电全部直接输入电网,电量收益明显优于前 2 个方案,但增加了调频、调相成本,虽可采用抽水蓄能机组来调节,但需要一定的有功消耗,当风电场装机容量增大时,抽水蓄能电站要增加装机容量,故其最优经济指标受风电场装机容量的影响较大.

情况 1 和情况 2 的最优运行方案都是方案 3,即风电场装机容量的大小对运行方案选择影响较小,但 2 种情况的最优经济指标相差很大.由情况 2 可见,当风电场的装机容量较小时,系统运行不经济,但考虑抽水蓄能电站对整个电网产生的容量效益、动态效益,尤其是在并网风电成本不断降低、常规能源成本增加或短缺的背景下,通过抽水蓄能电站使风电得到最大化开发利用仍是合理的.

例 2 与例 1 相比,各项经济指标相差很大.例 2 的日平均风速较例 1 大,高风速大多出现在低电价时段,因此其方

表 1 不同运行方案的各项经济指标比较  
Table 1 Comparison of different economic indexes  
in different operation schemes

算例	情况	运行 方案	$C_L$ (元· (MW·h) <sup>-1</sup> )	$\beta$	抽水蓄能 电站装机 容量/MW	$B_p$ (元· (MW·h) <sup>-1</sup> )	$B_r$ (元· (MW·h) <sup>-1</sup> )	综合经济 指标 $S_t$ (元· (MW·h) <sup>-1</sup> )
1	情况 1:含 100 台风机	1	203.429	0.673	100.910	170.447	104.192	71.210
		2	186.881	0.638	93.131	178.900	106.119	98.138
		3	174.837	0.574	99.032	187.334	109.171	121.668
	情况 2:含 45 台风机	1	195.100	0.901	94.565	76.575	79.839	-38.686
		2	180.615	0.869	91.820	95.422	85.070	-0.123
		3	179.741	0.857	94.511	98.418	86.877	5.554
2	情况 1:含 100 台风机	1	166.208	0.526	114.580	200.892	111.134	145.818
		2	156.983	0.490	111.492	206.689	112.456	162.161
		3	161.427	0.411	143.740	209.461	114.715	162.748
	情况 2:含 45 台风机	1	175.521	0.834	102.793	113.672	90.134	28.286
		2	164.335	0.804	100.220	127.659	94.016	57.341
		3	171.292	0.784	113.066	129.867	96.126	54.701

案1的抽水成本大大减小,方案2、3的电收益也大幅增加,综合经济指标明显变好,可见风速日变化规律对于风电-抽水蓄能联合系统的运行经济性有很大的影响.情况1的最优运行方案为方案3,而情况2的最优运行方案为方案2,可见风速日变化规律还直接影响运行方案的选择.情况1的风电场和抽水蓄能电站装机容量大于情况2,但其单位电能成本却较小,其原因在于:在较好的风速条件下,抽水蓄能电站可使有效输入电网的风电大幅增加.

由图6可见,3种运行方案的上水库任意时刻蓄水量均可满足峰荷时抽水蓄能电站的发电需求,且优化时段末的蓄水量达到最小,说明所求出的 $\beta$ 是最优的.本文计算模型是合理的.

## 4 结 语

a. 本文假设风电场附近具备建设相当规模抽水蓄能电站的条件,没有考虑其他因素(如地形、水源等条件)的制约作用.

b. 风电-抽水蓄能系统可使电网内的常规发电厂以最小容量稳定运行,则电网对常规能源的依赖性可明显减小,且 $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 的排放量也显著降低,因此风电-抽水蓄能联合系统具有可观的经济效益和环境效益.

c. 该优化运行模型也适用于其他间歇性的可再生能源与抽水蓄能的联合系统.

## 参考文献:

- [1] BLUNDEN J. Intermittent wind generation: summary report of impacts on grid system operations[R]. California: California Energy Commission, 2004.
- [2] 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] BECHRAKIS D A, MCKEOGH E J, GALLAGHER P D. Simulation and operational assessment for a small autonomous wind-hydrogen energy system[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(1): 46-59.
- [4] ELHADIDY M A, SHAAHID S M. Optimal sizing of battery storage for hybrid(wind + diesel) power system[J]. Renewable Energy, 1999, 18(1): 77-86.
- [5] DENHOLM P. Improving the technical, environmental and social performance of wind energy systems using biomass-based energy storage[J]. Renewable Energy, 2006, 31(9): 1355-1370.
- [6] BUENO C, CARTA J A. Technical-economic analysis of wind-powered pumped hydrostorage systems, part I: model development[J]. Solar Energy, 2005, 78(3): 382-395.
- [7] BUENO C, CARTA J A. Wind powered pumped hydro storage systems as a means of increasing the penetration of renewable energy in the Canary Islands[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2006, 10(4): 312-340.
- [8] CASTRONUOVO E D, LOPES J A P. Optimal operation and hydro storage sizing of a wind-hydro power plant[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2004, 26(10): 771-778.
- [9] 王瑞雪. 基于PSASP扩展的风力发电系统综合分析程序[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [10] 陈金富, 陈海焱, 段献忠. 含大型风电场的电力系统多时段动态优化潮流[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 31-35.

## Optimal operation model for wind-powered pumped storage system

TAN Zhi-zhong, LIU De-you, OU Chuan-qi, WANG Feng

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Three feasible schemes for operation of wind-powered pumped storage system were proposed as follows: all of wind power was supplied to pumped storage plants for water pumping; part of wind power was directly transported to grid, while the rest was supplied to pumped storage plants for water pumping based on the capacity of grid and output of wind farm; all of wind power was directly transported to grid. An optimal operation model for wind-powered pumped storage system was established. With the model, the minimum capacity for conventional power plants in normal operation and the installed capacity for pumped storage plants needed in grid with certain amount of wind power were calculated, and an economic evaluation model was developed. Based on the evaluated result, the optimal operation scheme for wind-powered pumped storage system was selected.

**Key words:** wind-powered pumped storage system; combined operation; operation model; economic evaluation