

文章编号:1671-251X(2017)11-0080-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2017.11.016

风-光-抽水蓄能联合互补发电系统研究

温颖, 吴胜磊

(中国矿业大学 电气与动力工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:针对废旧地下矿井极易造成地表塌陷、水土流失的问题,提出将井下相应区域改造成抽水蓄能电站,进而与风-光互补系统结合,建立风-光-抽水蓄能联合互补发电系统。以跟踪负荷曲线和系统出力波动性最小为优化目标,分别对风力发电、光伏发电和抽水蓄能电站建立出力数学模型,并在考虑风-光互补特性、电网传输功率等约束条件下,利用改进粒子群算法对模型进行求解。算例仿真结果验证了所建模型可以很好地跟踪优化目标,有效解决了新能源并网时的功率波动和消纳问题。

关键词:矿井改造;风-光互补;抽水蓄能;联合互补发电;改进粒子群算法

中图分类号:TD611

文献标志码:A

网络出版时间:2017-10-27 09:26

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20171027.0926.016.html>

Study on wind-light-pumped-storage combined complementary power generation system

WEN Ying, WU Shenglei

(School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology,
Xuzhou 221116, China)

Abstract: In view of problems that waste mine can easily cause surface subsidence and soil erosion, the paper proposed to transform corresponding underground area into pumped-storage power station, and then combined with wind-light complementary system to establish wind-light-pumped-storage combined complementary power generation system. Tracking load curve and minimizing system output volatility are taken as the optimization target to establish output mathematical models of wind power generation, photovoltaic power generation and pumped-storage power stations. Improved particle swarm optimization algorithm is used to solve the models under the constraint condition of considering wind-light complementary characteristics and power transmission power. The simulation results show that the models can be used to track the optimization target, and effectively solve the problem of power fluctuation and consumption when the new energy is connected.

Key words: mine reconstruction; wind-light complementary; pumped-storage; combined complementary power generation; improved particle swarm optimization algorithm

0 引言

我国矿产资源十分丰富,但是由于资源过度开采、设备陈旧、技术落后等问题,一些地下矿井被废弃,既浪费了土地资源,又极易造成地表塌陷、水土

流失等问题。将废旧地下矿井改造成抽水蓄能电站,与地面的风-光互补发电系统相结合,组成风-光-抽水蓄能联合互补发电系统,可以有效解决上述问题。风-光互补发电系统克服了风、光资源的间歇性、随机性缺点,充分利用两者在时间分布上的

收稿日期:2017-06-14;修回日期:2017-08-16;责任编辑:胡娴。

基金项目:国家自然科学基金项目(51504253);江苏省自然科学基金项目(BK20161185)。

作者简介:温颖(1990—),女,山东菏泽人,硕士研究生,主要研究方向为智能电网和新能源并网优化,E-mail:1078253283@qq.com。

引用格式:温颖,吴胜磊.风-光-抽水蓄能联合互补发电系统研究[J].工矿自动化,2017,43(11):80-85.

WEN Ying, WU Shenglei. Study on wind-light-pumped-storage combined complementary power generation system[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(11): 80-85.

互补性,能够稳定、可靠地输出电能,减少并网时对电网的冲击^[1]。但该系统发电量多且不易储存,抽水蓄能电站可借助水泵抽水过程将多余电能储存起来,在发电量不足的时候,通过水轮机放水过程补充电能,具有灵活、可靠、环保等优点^[2]。

目前,将地下废旧矿井改造成抽水蓄能电站的相关研究不多,大多是将地表抽水蓄能电站作为储能装置,且系统优化研究多以成本最小和收益最大为目标,较少考虑跟踪负荷优劣情况。如文献[3]选取风-光-蓄系统总成本最小为目标函数,根据供电可靠性约束和入网功率波动约束进行分时段优化。文献[4]建立了风-光-抽水蓄能复合系统模型,并在 VC 2008 开发环境下对模型进行了仿真。文献[5]研究了以抽水蓄能电站为储能装置的风-光互补系统容量优化配置,提出一种变步长循环离散算法,并利用 HOMER 优化软件工具进行仿真分析。文献[6]研究了抽水蓄能电站容量优化配置的仿真模型,采用改进粒子群算法,以系统经济收益最大化为目标对模型进行求解。

基于上述研究,本文首先介绍了利用废旧矿井改造的地下抽水蓄能电站,建立风-光-抽水蓄能联合互补发电系统模型,以抽水蓄能、电网传输功率、跟踪调度曲线等作为约束条件,得到风-光互补出力波动最小及跟踪负荷曲线优化配置模型;然后利用改进粒子群算法对优化模型进行求解;最后对系统模型进行仿真和计算,验证其有效性和合理性。

1 系统结构

地下抽水蓄能电站的建造过程充分利用原有井下空间,不需重新开凿和消耗地表土地资源。上、下水库分别被安置在原矿井的巷道群和采空区,水泵、水轮机和发电机仍置于原矿井机房,如图 1 所示。只需在原有废旧矿井的基础上进行相应改造、调整和封固,即可建成稳定、通畅的水库空间和动力系统空间。经改造后的井下空间稳定性增加,不仅避免了封井后可能出现的地表塌陷问题,也避免了后续可能引起的水污染问题。

风-光-抽水蓄能联合互补发电系统包括风力发电机、光伏阵列、水泵、水轮机、逆变器和控制器,如图 2 所示。风力发电系统和光伏发电系统分别将风能与太阳能转换成电能;水泵将下水库的水抽至上水库,储存电能;水轮机将上水库的水放至下水库,释放电能;逆变器将光伏发电系统发出的直流电转换成交流电;控制器根据风速和日照的变化调整输出端工作状态,以保证系统稳定运行。

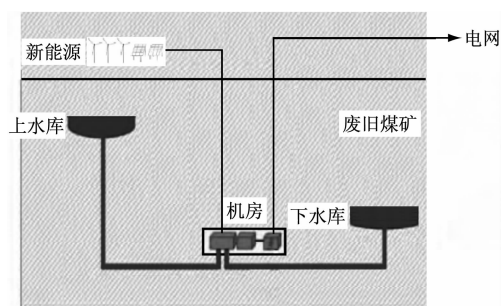


图 1 地下抽水蓄能电站

Fig. 1 Underground pumped-storage power station

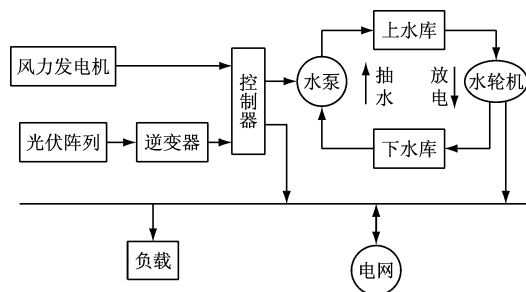


图 2 风-光-抽水蓄能联合互补发电系统结构

Fig. 2 Structure of wind-light-pumped-storage combined complementary power generation system

通过调节地下抽水蓄能电站的储发状态和能力,使系统总出力尽量满足负荷所需。外部电网可通过公共连接点与系统进行功率传输,使系统出力曲线有效地跟踪负荷曲线,提高系统对新能源的消纳能力。

2 系统模型

2.1 风力出力模型

对风电机组来说,实测风速与轴毂的高度成指数变化,计算风电出力时需将实测风速转换成风力发电机轴毂处风速,转换公式为

$$v = v_1 \left(\frac{L}{L_1} \right)^\beta \quad (1)$$

式中: v 为实测风速; L_1 为任意高度; v_1 为 L_1 高度处轴毂的风速; L 为实际轴毂高度; β 为转换指数,取值范围为 0.125~0.5。

风力机组输出功率 P_f 受风速变化影响,其计算公式为

$$P_f = \begin{cases} 0, & 0 \leq v \leq v_b, v \geq v_p \\ P_n \frac{v - v_b}{v_n - v_b}, & v_b < v < v_n \\ P_n, & v_n \leq v < v_p \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_n 为风力发电机额定输出功率; v_b , v_p , v_n 分别为风力机组切入、切出、额定风速。

2.2 光伏出力模型

光伏电池板摆放时一般会有一定倾斜角,倾斜

角度不同,电池板所获得的光照辐射量也不同^[7]。采用 Hay 模型^[8]计算光伏电池板获得的太阳辐射量 W_T :

$$W_T = W_d R_d + W_s \left[\frac{W_d}{W_0} R_d + \left(1 - \frac{W_d}{W_0} \right) \times \left(\frac{1 + \cos \gamma}{2} \right) \right] + \tau W \left(\frac{1 - \cos \gamma}{2} \right) \quad (3)$$

式中: W_d 、 W_s 分别为水平面的直接辐射量、散射辐射量; R_d 为倾面与水平面直接辐射量的比值; W_0 为大气层外水平面上的辐射量; γ 为光伏板倾角; τ 为地表反射系数; W 为水平面的太阳辐射总量。

光伏发电系统由一定数量的光伏电池组件单元组成,其出力可表示为

$$P_v = N_v f_v Y_v \left(\frac{W_T}{W_{ST}} \right) \quad (4)$$

式中: N_v 为光伏电池板数量; f_v 为光伏转换系数,其值与光伏板洁净度和工作温度有关; Y_v 为光伏电池组件额定功率; W_T 和 W_{ST} 分别为电池板面太阳辐射量和标准太阳辐射量。

2.3 抽水蓄能电站输出功率模型

抽水蓄能电站是一个容量很大的储能系统,起调节系统功率不平衡的作用。它实质上并没有发电,而只是通过能量转换将部分电能时空中进行分配。当抽水蓄能电站工作在抽水状态时,水泵工作,将电能转换成水能存储起来;当工作在放水状态时,水轮机工作,将水能转换成电能释放出去。

当抽水蓄能电站运行在抽水状态时,水泵转轴上的传递功率为

$$P_s = \frac{\pi}{30} N_r T_m D_d^2 L_d^{1.5} \quad (5)$$

式中: N_r 为单位转速; T_m 为单位力矩; D_d 为转轮直径; L_d 为上下游水位差。

当抽水蓄能电站运行在放水状态时,水轮机转轴上的传递功率为

$$P_p = 9.81 S_w D_d L_d \quad (6)$$

式中 S_w 为水流流速。

3 系统调度策略和运行优化

3.1 调度策略

风-光-抽水蓄能联合互补发电系统有独立运行和并网运行 2 种运行状态。独立运行时,由于水力和装机容量的限制,系统调节能力和效果不理想,所以,本文只考虑并网情况。并网运行时,电网作为负载和备用电源参与系统调度,控制器每个单位时间检测风-光出力,灵活调节抽水蓄能电站的工作状态和出力,跟踪负荷曲线^[9]。

系统在任意时刻都满足式(7):

$$P_T(t) = P_v(t) + P_f(t) + P_{ps}(t) - P_l(t) \quad (7)$$

式中: $P_T(t)$ 为系统与电网双向交换功率,系统向电网输电时其值为正,电网向系统输电时其值为负; $P_{ps}(t)$ 为抽水蓄能出力,发电状态时其值为正,抽水状态时其值为负; $P_l(t)$ 为负荷功率。

当风力发电和光伏发电出力大于负荷所需时,抽水蓄能电站为抽水工作状态,此时存在 2 种情况:

(1) 若系统的剩余功率大于抽水蓄能电站的抽水功率最大值 $P_{psp}^{\max}$,则系统向电网供电,传输功率为

$$P_T(t) = P_f(t) + P_v(t) - P_{psp}^{\max} - P_l(t) \quad (8)$$

(2) 若系统的剩余功率小于抽水蓄能电站的抽水功率最大值 $P_{psp}^{\max}$,则系统与电网之间没有功率传输。

当风力发电和光伏发电出力小于负荷所需功率时,抽水蓄能电站为发电工作状态,此时也存在 2 种情况:

(1) 若系统所需的功率差额小于抽水蓄能电站的发电功率最小值 $P_{psg}^{\min}$,则电网向系统供电,且传输功率为

$$P_T(t) = P_f(t) + P_v(t) + P_{psg}^{\min} - P_l(t) \quad (9)$$

(2) 若系统所需的功率差额大于抽水蓄能电站的发电功率最小值 $P_{psg}^{\min}$,则系统与电网之间没有功率传输。

3.2 优化模型

3.2.1 目标函数

在满足供电可靠性等条件下,风-光-抽水蓄能联合互补发电系统在并网运行时既要减少新能源接入对电网的冲击,又要使系统总出力曲线与负荷趋向一致。本文选取调度周期为 1 d,分为 24 个时段,以跟踪负荷调度曲线和平滑风-光互补系统功率输出为优化模型。

跟踪负荷调度曲线表达式为

$$\min \lambda = \left| \frac{\sum_{t=1}^{24} P_{al}(t)}{\sum_{t=1}^{24} P_z(t)} - 1 \right| \quad (10)$$

$$P_z(t) = P_f(t) + P_v(t) + P_{ps}(t) \quad (11)$$

式中: λ 为拟合差值; $P_{al}(t)$ 为负荷总用电量; $P_z(t)$ 为联合互补发电系统在第 t 时段的总出力。

该目标函数描述的是负载调度曲线总电量与系统出力比值越接近数值 1,则总出力与负荷曲线拟合得越好。

平滑风-光互补系统输出功率函数为

$$\min \xi = \sum_{t=2}^{24} |P_c(t) - P_c(t-1)| \quad (12)$$

$$P_c(t) = P_f(t) + P_v(t) \quad (13)$$

式中 $P_c(t)$ 为风-光互补系统第 t 时段的出力值。

该目标函数研究了 24 h 内风-光互补系统相邻时间出力波动大小情况。

3.2.2 约束条件

风电、光伏出力约束分别为

$$P_f^{\min} \leq P_f \leq P_f^{\max} \quad (14)$$

$$P_v^{\min} \leq P_v \leq P_v^{\max} \quad (15)$$

式中: $P_f^{\min}, P_f^{\max}$ 分别为风力发电机输出功率最小值和最大值; $P_v^{\min}, P_v^{\max}$ 分别为光伏阵列输出功率最小值和最大值。

风-光互补性约束为

$$k^{\min} \leq \frac{N_{wn} P_{wc}(t)}{N_{ve} P_{vc}(t)} \leq k^{\max} \quad (16)$$

式中: $k^{\min}, k^{\max}$ 分别为风-光机组容量比值的最小值和最大值; N_{wn} 为风电机组数量; N_{ve} 为光伏组件数量; $P_{wc}(t), P_{vc}(t)$ 分别为风力发电和光伏发电的装机容量。

依照当地风、光数据,按照文献[10]中的图形观察法近似求出风-光互补性能最好的容量比,在此基础上放宽范围即可得到 $k^{\min}$ 和 $k^{\max}$ 的值。

抽水蓄能电站约束包括以下 4 个方面:

(1) 库容能量平衡关系式:

$$C_{ps}(t) = C_{ps}(t-1) + \delta_1 P_{pu}(t) \Delta t - \frac{P_{ge}(t) \Delta t}{\delta_2} \quad (17)$$

式中: $C_{ps}(t)$ 为第 t 时段上水库容量; δ_1 和 δ_2 分别为抽水效率和发电效率; $P_{pu}(t)$ 为第 t 时段抽水蓄能电站的抽水额定出力; Δt 为时间变化量; $P_{ge}(t)$ 为第 t 时段抽水蓄能电站的发电额定出力。

(2) 水库库容约束:

$$0 \leq C_{ps}(t) \leq C_{ps}^{\max} \quad (18)$$

式中 $C_{ps}^{\max}$ 为水库最大库容量。

(3) 抽水、发电功率约束:

$$S_{1,t} P_{pu}^{\min} \leq P_{pu}(t) \leq S_{1,t} P_{pu}^{\max} \quad (19)$$

$$S_{2,t} P_{ge}^{\min} \leq P_{ge}(t) \leq S_{2,t} P_{ge}^{\max} \quad (20)$$

式中: $P_{pu}(t), P_{pu}^{\min}, P_{pu}^{\max}$ 分别为抽水蓄能电站处于抽水状态时的出力值、出力最小值和最大值; $P_{ge}^{\min}, P_{ge}^{\max}$ 分别为抽水蓄能电站处于发电状态时的出力最小值和最大值; $S_{1,t}, S_{2,t}$ 分别为抽水蓄能站抽水 and 发电运行时的状态参数变量。

(4) 电网传输约束:

$$P_T^{\min} \leq P_T \leq P_T^{\max} \quad (21)$$

式中 $P_T^{\min}, P_T^{\max}$ 分别为电网交互传输功率的最小值和最大值。

3.3 改进粒子群算法

传统的粒子群算法在迭代后期时会出现搜索能力欠佳、效率不高的情况,无法找到理想的最优解^[11-12]。为了提高粒子群算法的效率,提出改进的粒子群算法搜索速度和位置更新策略——跟踪靶向粒子策略。构造一个全局理想最优粒子作为靶向粒子,其余粒子通过比较与靶向粒子的距离 L_δ 来更新自身位置和速度^[13-14]。以靶向粒子为圆心、以 a 为半径画圆,如图 3 所示,圆内区域 I 为采用改进粒子群算法策略的理想区域。

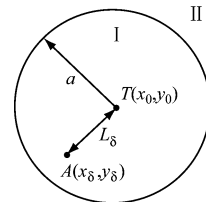


图 3 跟踪靶向粒子策略原理

Fig. 3 Principle of tracking targeted particle strategy

任意粒子 $A(x_\delta, y_\delta)$ 与靶向粒子 $T(x_0, y_0)$ 的距离为

$$L_\delta = \sqrt{(x_\delta - x_0)^2 + (y_\delta - y_0)^2} \quad (22)$$

当 $L_\delta \leq a$ 时,使用跟踪靶向粒子策略得到粒子的更新速度和位置分别为

$$\begin{aligned} V_{ij}^{k+1} = & V_{ij}^k + \alpha_1 \text{rand}_1 (P_b^k - X_{ij}^k) + \\ & \alpha_2 \text{rand}_2 (G_b^k - X_{ij}^k) + \alpha_3 \text{rand}_3 (E_b^k - X_{ij}^k) \end{aligned} \quad (23)$$

$$X_{ij}^{k+1} = X_{ij}^k + L_\delta \quad (24)$$

式中: V_{ij}^k, X_{ij}^k 分别为粒子 i 在第 j 维第 k 次迭代的速度和位置; P_b^k 和 G_b^k 分别为第 k 次迭代粒子自身的最优解和粒子集群的最优解; E_b^k 为第 k 次迭代的最优值; α_1 为自身加速系数; α_2 为全局加速系数; $\alpha_3 = \alpha_1 (1 - \exp(-k\alpha_2))$; $\text{rand}_1, \text{rand}_2$ 和 rand_3 均为 $[0, 1]$ 的任意数; X_δ^k 为任意粒子 A 在第 k 次迭代的位置。

当 $L_\delta > a$ 时,粒子的更新速度和位置分别为

$$\begin{aligned} V_{ij}^{k+1} = & V_{ij}^k + \alpha_1 \text{rand}_1 (P_b^k - X_{ij}^k) + \\ & \alpha_2 \text{rand}_2 (G_b^k - X_{ij}^k) \end{aligned} \quad (25)$$

$$X_{ij}^{k+1} = X_{ij}^k + V_{ij}^k \quad (26)$$

4 算例

选择装机容量分别为 150 MW 的风力发电站、50 MW 的光伏发电站和 40 MW 的抽水蓄能电站构成风-光-抽水蓄能联合互补发电系统进行仿真研究。负荷根据日负荷曲线等比例缩小,调度周期为 1 d,分为 24 个时段。某地某天风速、光照辐射数据见表 1。

表 1 某天风速、光照辐射数据

Table 1 Wind speed and light radiation data of some where a certain day

时段	风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	光照辐射/ ($\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$)	时段	风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	光照辐射/ ($\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$)
1	8.527	0	13	8.527	0.302 9
2	8.453	0	14	8.453	0.310 3
3	8.389	0	15	8.389	0.274 9
4	8.116	0	16	8.116	0.169 4
5	7.287	0	17	7.287	0.107 3
6	6.979	0	18	6.979	0.044 2
7	6.012	0	19	6.012	0.012 4
8	6.458	0.022 9	20	6.458	0
9	6.034	0.083 8	21	6.034	0
10	4.687	0.181 8	22	4.687	0
11	4.583	0.235 8	23	4.583	0
12	4.573	0.295 9	24	4.573	0

参考相关资料,根据仿真软件模拟分析得到 1 d 的风电出力 P_f 、光电出力 P_v 、抽水蓄能出力 P_{ps} 和负荷 P_l 的分布曲线,如图 4 所示。

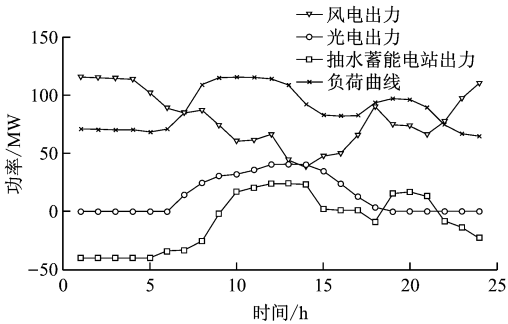


图 4 风-光-抽水蓄能出力曲线及负荷曲线
Fig. 4 Output curve and load curve of wind-light-pumped-storage

由图 4 可见,风力机组全天发电,中午出力最小,输出功率波动很大;光伏阵列只在 06:30—19:20 发电,中午出力最大;二者在时间分布上具有互补特性。

系统出力曲线和电网功率交换曲线如图 5 所示。

由图 5 可知,风-光互补出力的峰谷差比风、光单独出力的峰谷差小,但是互补出力的波动性仍然很大,在并网时仍会对电网造成较大冲击。此外,风-光互补出力曲线不能跟踪负荷曲线,很多时段无法满足负荷需求。

在风-光互补出力较大时,抽水蓄能电站工作在抽水状态进行储能,若还有剩余出力,则联合互补

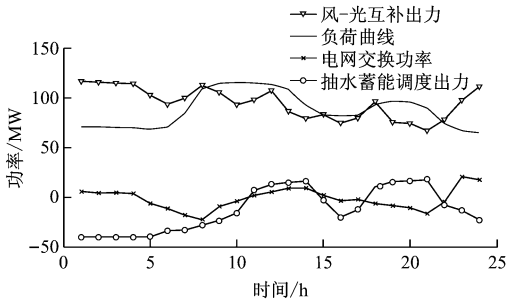


图 5 系统出力曲线和电网功率交换曲线
Fig. 5 System output curve and grid power exchange curve
发电系统向电网传输功率。在风-光出力较小时,抽水蓄能电站工作在放水状态进行发电,若还是无法满足负荷需求,则电网向联合互补发电系统传输功率。

风-光-抽水蓄能联合互补发电系统出力 and 负荷曲线如图 6 所示。

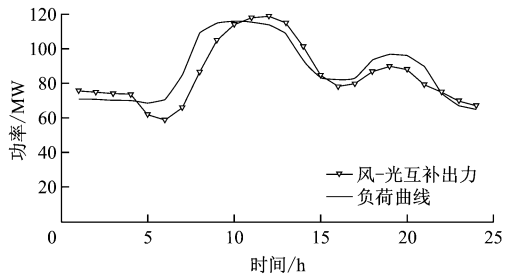


图 6 系统出力曲线和负荷曲线
Fig. 6 System output curve and load curve

从图 6 可看出,风-光-抽水蓄能联合互补发电系统出力波动较小,减小了风-光并网时对电网造成的冲击,且系统出力曲线走向与负荷曲线走向基本一致,跟踪负荷曲线效果理想。

5 结论

(1) 提出将废旧矿井改造成地下抽水蓄能电站,建立风-光-抽水蓄能联合互补发电系统模型,提高了空间和设备的重复利用率,充分利用了风能和太阳能的互补特性。

(2) 在风-光出力充足时,抽水蓄能电站将多余电能转换为水能存储起来,充当储能装置作用;在风-光出力不足时,抽水蓄能电站放水发电,充当备用电源作用。这种机制提高了系统调节输出的灵活性及其对新能源的消纳能力和风-光并网穿透率。

(3) 以跟踪负荷曲线和系统出力波动最小为优化目标,采用改进粒子群算法对系统模型进行分析,利用仿真软件对算例进行计算研究,验证了本文设置的目标函数的合理性和改进算法的有效性,也证明了改造废旧矿井并将其用于风-光-抽水蓄能联合互补发电系统的可行性。

参考文献(References):

- [1] 谢和平,侯正猛,高峰,等. 煤矿井下抽水蓄能发电新技术:原理、现状及展望[J]. 煤炭学报,2015,40(5): 965-972.
XIE Heping, HOU Zhengmeng, GAO Feng, et al. A new technology of pumped-storage power in underground coal mine: principles, present situation and future[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(5):965-972.
- [2] 罗毅,张若含. 风-光-水联合发电系统优化调度研究[J]. 太阳能学报,2015,36(10): 2492-2498.
LUO Yi, ZHANG Ruohan. Research of optimal scheduling of hybrid PV and wind power system[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2015,36(10): 2492-2498.
- [3] 胡林献,顾雅云,姚友素. 并网型风光互补系统容量优化配置方法[J]. 电网与清洁能源,2016,32(3): 120-126.
HU Linxian, GU Yayun, YAO Yousu. Optimal capacity configuration method for grid-connected wind-solar complementary power system [J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering,2016,32(3): 120-126.
- [4] 徐林,阮新波,张步涵,等. 风光蓄互补发电系统容量的改进优化配置方法[J]. 中国电机工程学报,2012,32(25):88-98.
XU Lin, RUAN Xinbo, ZHANG Buhan, et al. An improved optimal sizing method for wind-solar-battery hybrid power system[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2012, 32(25): 88-98.
- [5] 任岩,郑源,李延频. 风/光/抽蓄复合系统的建模与仿真[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(6):518-522.
REN Yan, ZHENG Yuan, LI Yanpin. Modeling and simulation of hybrid wind/PV/pumped-storage system [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2011,29(6): 518-522.
- [6] 杨和稳,任增. 风光互补发电系统中抽水蓄能电站的优化配置[J]. 计算机仿真,2015,32(4):111-115.
YANG Hewen, REN Zeng. Research on optimal allocation of pumped storage station in wind and photovoltaic complementary generation system[J]. Computer Simulation,2015,32(4):111-115.
- [7] SINGHAL P K, SHARMA R N. Dynamic programming approach for solving power generating unit commitment problem[C]// 2nd International Conference on Computer and Communication Technology,2011.
- [8] 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.
- [9] PAPAETHYMIOS 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.
- [10] 刘芳,潘毅,杨军峰,等. 风电-火电-抽水蓄能联合优化机组组合模型[J]. 中国电机工程学报,2015,35(4):766-775.
LIU Fang, PAN Yi, YANG Junfeng, et al. Unit commitment model for combined optimization of wind power-thermal power-pumped storage hydro [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering,2015,35(4):766-775.
- [11] BAKIRTZIS E A, BISKAS P N, LABRIDIS D P, et al. Multiple time resolution unit commitment for short-term operations scheduling under high renewable penetration [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2014,29(1):149-159.
- [12] 胡泽春,丁华杰,孔涛. 风电-抽水蓄能联合日运行优化调度模型[J]. 电力系统自动化,2012,36(2): 36-41.
HU Zechun, DING Huajie, KONG Tao. A joint daily operational optimization model for wind power and pumped-storage plant [J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(2):36-41.
- [13] 徐飞,陈磊,金和平,等. 抽水蓄能电站与风电的联合优化运行建模及应用分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(1):149-154.
XU Fei, CHEN Lei, JIN Heping, et al. Modeling and application analysis of optimal joint operation of pumped storage power station and wind power[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(1): 149-154.
- [14] 邹金,赖旭,汪宁渤. 以减少电网弃风为目标的风电与抽水蓄能协调运行[J]. 电网技术,2015,39(9): 2472-2477.
ZOU Jin, LAI Xu, WANG Ningbo. Mitigation of wind curtailment by coordinating with pumped storage[J]. Power System Technology,2015,39(9): 2472-2477.