

DOI: 10.7667/PSPC170034

# 风-光-海水抽蓄联合发电系统的调度策略研究

曹宇<sup>1</sup>, 汪可友<sup>1</sup>, 石文辉<sup>2</sup>, 李国杰<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 国网中国电力科学研究院, 北京 100192)

**摘要:** 研究了海岛风-光-海水抽蓄联合发电系统的调度策略问题。提出了联合发电系统的3种调度方法, 包括“单一型调度”、“一次复合型调度”和“二次复合型调度”。根据每种调度方法, 设计多种相应策略, 包括3种“单一型调度”策略、3种“一次复合型调度”策略和6种“二次复合型调度”策略。以南麋岛为例, 先对12种调度策略下的联合系统分别进行基于模糊多目标规划与遗传算法的容量优化, 然后分析比较12种调度策略下的系统最佳容量配置的运行结果, 总结3种调度方法的利弊, 并选取最佳调度策略。

**关键词:** 风电场; 光伏电站; 海水抽蓄; 调度; 优化

## Study on dispatching strategies of a wind-solar-seawater pumped storage hybrid power system

CAO Yu<sup>1</sup>, WANG Keyou<sup>1</sup>, SHI Wenhui<sup>2</sup>, LI Guojie<sup>1</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. State Grid China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** This paper researches the dispatching problem of a wind-solar-seawater pumped storage hybrid power system in sea islands, puts forward three kinds of dispatching methods of the hybrid power system, which include single dispatching, simple mixed dispatching and complex mixed dispatching. On basis of each kind of dispatching method, several kinds of related dispatching strategies are designed, including three kinds of single dispatching strategies, three kinds of simple mixed dispatching strategies and six kinds of complex mixed dispatching strategies. Taking Nanji Island for an example, first, this paper optimizes the capacity of the hybrid system of 12 dispatching strategies based on fuzzy multi-objective programming and genetic algorithm, then analyzes and compares operation results of optimal capacity allocation of 12 dispatching strategies, summarizes the advantages and disadvantages of the three dispatching methods and selects the best dispatching strategies.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2014AA052003).

**Key words:** wind power farm; photovoltaic plant; seawater pumped storage; dispatching; optimizing

## 0 引言

海岛由于难以与大陆电网相接或联网成本极高, 且化石资源匮乏, 故往往依靠进口化石燃料发展柴油、天然气发电系统。但即使如此也导致发电成本高、供电可靠性低等问题。海岛通常具有丰富的风能、太阳能等资源, 但这类新能源具有随机性和波动性, 故需储能设施来提高供电可靠性。国外

已有类似案例, 如希腊的 Karpathos 岛、西班牙的加那利群岛建立的风电-抽蓄联合系统。

文献[1]利用相关机会目标规划方法建立风光储联合发电系统储能调度模型, 并以新型混合智能算法求解联合发电系统日前储能调度计划。文献[2]提出了一种基于功率多频率尺度分析的风光水气储联合系统日前调度策略, 较好地解决了大规模风光并网的功率波动问题, 实现了系统功率平稳输出。文献[3]提出微网中可削减负荷补偿代价模型, 并以微网运行一天综合经济成本最低为目标建立可削减负荷、分布式电源、燃料电池联合优化调度的4种

基金项目: 国家 863 课题 (2014AA052003); 上海市科委 (13231204002)

模式。文献[4]研究了以一种变权重系数和关联规则挖掘混合算法,对风光储联合发电系统协调运行策略进行优化,有效延长了蓄电池的使用寿命,提高了系统的经济效益。文献[5]为了准确分析含多种分布式电源的微网储能优化配置方案,建立了基于经济调度并计及制热收益的热电联产型微网储能优化配置模型。文献[6]针对含电动汽车的风光储并网型微电网环境,构建了最小化微电网与外部电网交互功率和平抑可再生能源功率波动的多目标调度优化模型。文献[7]针对并网条件下的微网优化调度问题,提出一种基于分时电价机制下的储能单元固定调度策略与可控微源动态优化调度相结合的微网运行调度方法。

本文提出风-光-海水抽蓄联合系统的3种调度方法。基于每种调度方法,设计不同的具体运行策略,总计12种调度策略。以南鹿岛为例,先对每种调度策略下的联合系统进行基于模糊多目标规划和遗传算法的容量优化,得出每种调度策略下的系统最佳容量配置,然后通过比较12种调度策略下的联合系统最佳容量配置的运行结果,讨论直接风光渗透率对于具体调度方法的影响以及三种调度方法对联合系统的经济性、供电可靠性、环保性和可再生能源利用率等方面的不同影响,对海岛建立风光储系统的规划具有指导意义。

## 1 系统建模

### 1.1 风电场建模

风力发电机功率为<sup>[8]</sup>

$$P_{wt} = \begin{cases} 0, & 0 \leq v < v_s \\ (A + Bv + Cv^2)P_r, & v_s \leq v < v_r \\ P_r, & v_r \leq v < v_c \\ 0, & v \geq v_c \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $v_s$  是切入风速;  $v_r$  是额定风速;  $v_c$  是切出风速;  $v$  是轮毂高度风速, m/s;  $P_r$  是额定功率, kW;  $A$ 、 $B$ 、 $C$  为常数。

风电场包括  $n_w$  台相同风力发电机, 总输出功率为

$$P_{wf} = n_w P_{wt} \quad (2)$$

### 1.2 光伏电站建模

气象部门一般只提供地表水平面太阳辐射总量  $H_g$ 。

大气层外水平面太阳辐射量为<sup>[9]</sup>

$$H_a = E_{sc} \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 (\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega) \quad (3)$$

式中:  $E_{sc}$  是太阳常数;  $\left( \frac{r_0}{r} \right)^2$  是当天日地距离订正系数;  $\delta$  是太阳赤纬角;  $\varphi$  是当地纬度;  $\omega$  是太阳时角, (°)。

Erbs 直散分离模型<sup>[10]</sup>为

$$K_d = \begin{cases} 1 - 0.09K_t, & K_t \leq 0.22 \\ A - BK_t + CK_t^2 - DK_t^3 + EK_t^4, & 0.22 < K_t \leq 0.8 \\ 0.165, & K_t > 0.8 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $K_t = H_g / H_a$ ;  $K_d$  是地表水平面太阳散射量  $H_d$  与  $H_g$  之比;  $A=0.9511$ ,  $B=0.1601$ ,  $C=4.388$ ,  $D=16.638$ ,  $E=12.336$ 。

地表倾斜面太阳辐射量  $H_{g\theta}$  为<sup>[11]</sup>

$$H_{g\theta} = R_b H_D + H_d \cos^2 \left( \frac{\beta}{2} \right) + H_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \rho \quad (5)$$

式中:  $R_b$  是斜面系数;  $\beta$  是倾角, (°);  $\rho$  是地面反射率;  $H_D$  是地表水平面太阳直射量,  $H_D = H_g - H_d$ 。

采用遍历数值法<sup>[12]</sup>计算光伏阵列最佳倾角  $\beta_m$ 。选取  $0^\circ \sim 90^\circ$  作为倾角工作区间, 以  $1^\circ$  为倾角递增值, 计算各倾斜角下地表倾斜面月太阳辐射总量, 最大月太阳辐射总量的倾角为该月光伏阵列最佳倾角。由式(5)计算最佳倾斜面太阳辐射量  $H_{gm}$ 。

光伏电站采用 MPPT<sup>[13]</sup>, 功率为

$$P_{pv} = n \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} I_{sc} \frac{H_{gm}}{H_{ref}} V_{oc} \frac{\ln(I_{sc})}{\ln(I_{sc} H_{ref} / H)} \frac{T_{ref}}{T} \quad (6)$$

$$n = n_{pv} n_s n_p \quad (7)$$

式中:  $V_{mp}$  是最佳工作电压,  $V_{oc}$  是开路电压, V;  $I_{mp}$  是最佳工作电流,  $I_{sc}$  是短路电流, A;  $H_{gm}$  是最佳倾斜面太阳辐射量,  $W/m^2$ ;  $H_{ref}$  是参考太阳辐射量,  $1000 W/m^2$ ;  $T$  是工作温度, °C;  $T_{ref}$  是参考温度,  $25^\circ C$ ;  $n_s$  是阵列组件串联数;  $n_p$  是阵列组件并联数;  $n_{pv}$  是电站阵列个数。

### 1.3 海水抽蓄电站建模

海水抽蓄电站由上水库、下水库(大海)、水泵站和水电站等组成<sup>[14]</sup>。下水库水位是常数, 海拔  $Z_d$  为 0。上水库运行模型如图 1 所示。为尽量消纳电能, 水泵站采取 3 种不同功率水泵组合运行。对所分配电能, 总优先由大功率水泵消纳, 其次由中功率水泵消纳, 最后由小功率水泵消纳<sup>[15]</sup>。水泵站运行模型如图 2 所示, 其中  $\text{int}()$  为取整函数。水电站由  $n_t$  台相同水轮发电机组组成, 水电站运行模型如图 3 所示。



图 1 上水库运行模型

Fig. 1 Operation model of upper reservoir

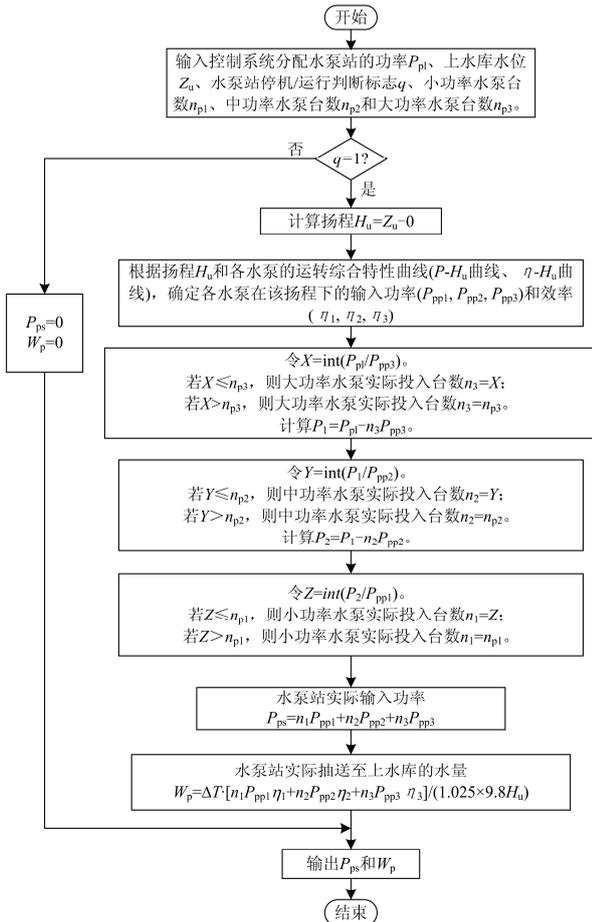


图 2 水泵站运行模型

Fig. 2 Operation model of water pumping station

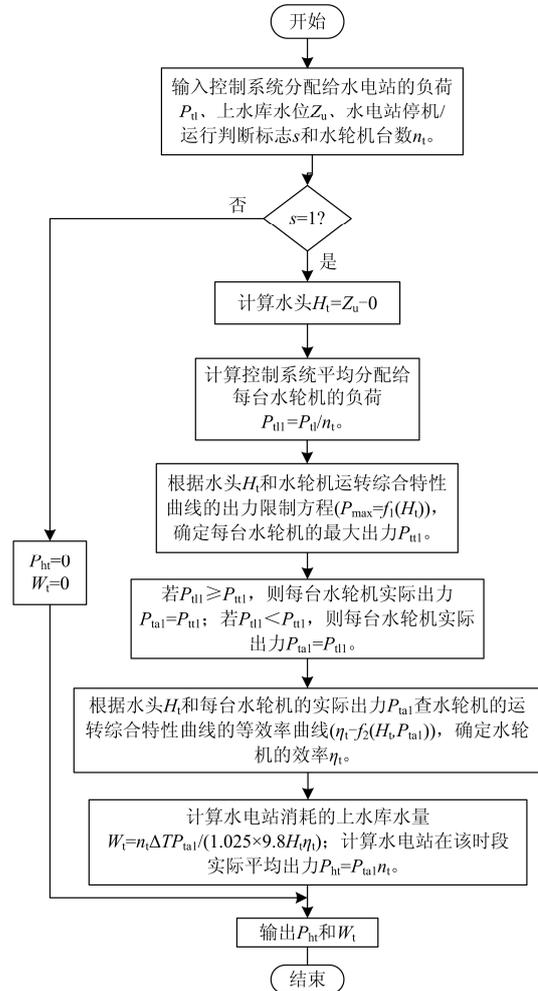


图 3 水电站运行模型

Fig. 3 Operation model of hydropower station

### 1.4 微燃机电站建模

微燃机电站由  $n_m$  台相同微燃机组组成。其输出功率  $P_{ma}$  取决于控制系统分配的负荷  $P_{mt}$  与电站额定功率的比较结果。 $P_{mn}$  是单台微燃机额定功率, kW。

$$P = \begin{cases} P_{mt}, & P_{mt} < n_m P_{mn} \\ n_m P_{mn}, & P_{mt} \geq n_m P_{mn} \end{cases} \quad (8)$$

## 2 系统调度策略

如图 4 所示, 控制系统通过控制线路调控风电场等子系统, 通过线路开关改变调度策略。本文提出 3 种调度方法, 即“单一型调度”、“一次复合型调度”和“二次复合型调度”。

### 2.1 单一型调度

单一型调度是指系统运行过程中只采用一种运行模式的调度方法。基于风光直接渗透率, 建立 3 种单一型调度策略, 即直接渗透率为 0% 的策略 1、

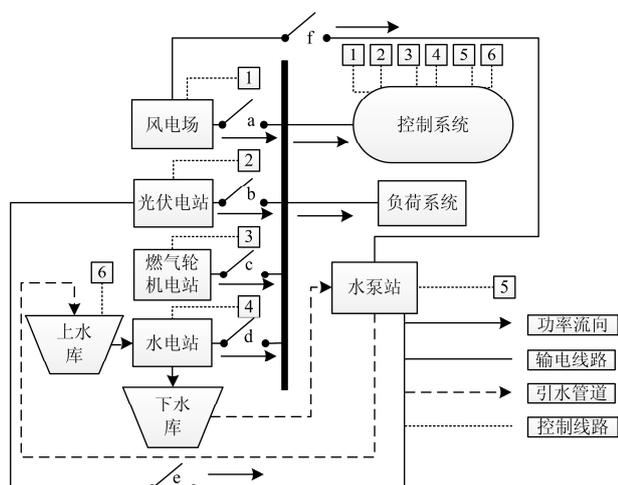


图4 联合发电系统整体控制图

Fig. 4 Overall control diagram of hybrid power system

直接渗透率规定不超过 30% 的策略 2 和直接渗透率规定不超过 50% 的策略 3。

#### 1) 策略 1

如图 4, 断开开关 a、b; 闭合开关 c、d、e、f。将整个系统分成两个独立的小型系统。系统 1 由风电场、光伏电站和水泵站组成; 系统 2 由水电站、微燃机电站和负荷组成。风光全部输入水泵站。水电站优先满足负荷, 微燃机电站作备用。

#### 2) 策略 2 和策略 3

如图 4, 闭合所有开关。风光优先输入负荷, 但直接渗透率不超过负荷的  $\alpha\%$ 。若风光有余, 则输入水泵站。其他负荷由水电站优先满足, 微燃机电站作备用。若采用策略 2, 则  $\alpha$  为 30。若采用策略 3, 则  $\alpha$  为 50。

### 2.2 一次复合型调度

一次复合型调度是指将单一型调度分成两种模式交替运行的调度方法。控制水位  $Z_{co}$  指当上水库水位  $Z_u$  为正常最大蓄水位  $Z_{max}$ 、水泵站停机、负荷为最大且仅由水电站满足时,  $Z_u$  刚好降到水电站不能满足最大负荷时的水位。利用  $Z_{co}$  将一次复合型调度分成两种运行模式。如图 5 所示, 模式 1 是指水泵站和微燃机电站可运行、水电站停机、 $Z_u$  从  $Z_{co}$  上升到  $Z_{max}$  的过程, 若  $Z_u > Z_{max}$ , 则系统转入模式 2 运行; 模式 2 是指水电站和水泵站可运行、微燃机电站停机、 $Z_u$  从  $Z_{max}$  下降到  $Z_{co}$  的过程, 若  $Z_u < Z_{co}$ , 则系统转入模式 1 运行。

单一型调度中, 调度复杂。而一次复合型调度中, 控制系统利用  $Z_u$  变化判断微燃机电站或水电站是否投入运行, 调度简单方便。

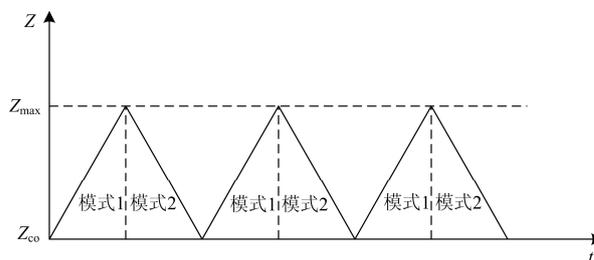


图5 采用两种模式交替运行的上水库水位变化图

Fig. 5 Change of water level in the upper reservoir which has two alternate operating ways

基于 3 种单一型调度策略, 设计 3 种一次复合型调度策略, 即直接渗透率为 0% 的策略 4、直接渗透率规定不超过 30% 的策略 5 和直接渗透率规定不超过 50% 的策略 6。

#### 1) 策略 4

如图 4。模式 1 中: 闭合开关 c、e 和 f, 断开开关 a、b 和 d; 风光全输入水泵站; 负荷只由微燃机电站承担。模式 2 中: 闭合开关 d、e 和 f, 断开开关 a、b 和 c; 风光全输入水泵站; 负荷只由水电站承担。

#### 2) 策略 5 和策略 6

如图 4。模式 1 中: 闭合开关 a、b、c、e 和 f, 断开开关 d; 风光优先输入负荷, 且直接渗透率不超过  $\alpha\%$ ; 若风光有余, 则水泵站继续消纳; 剩余负荷只由微燃机电站负责。模式 2 中: 闭合开关 a、b、d、e 和 f, 断开开关 c; 风光优先输入负荷, 且直接渗透率不超过  $\alpha\%$ ; 若风光有余, 则水泵站继续消纳; 剩余负荷只由水电站负责。若采用策略 5, 则  $\alpha$  为 30。若采用策略 6, 则  $\alpha$  为 50。

### 2.3 二次复合型调度

二次复合型调度是指将不同一次复合型调度交叉结合而成的方法。基于上述 3 种一次复合型调度策略, 设计如表 1 所示的 6 种二次复合型调度策略。

表 1 二次复合型调度策略

二次复合型调度策略	具体做法
策略 7	策略 4 模式 1+策略 5 模式 2
策略 8	策略 5 模式 1+策略 4 模式 2
策略 9	策略 4 模式 1+策略 6 模式 2
策略 10	策略 6 模式 1+策略 4 模式 2
策略 11	策略 5 模式 1+策略 6 模式 2
策略 12	策略 6 模式 1+策略 5 模式 2

## 3 系统容量优化

以经济性、供电可靠性、环保性和可再生能源

利用率为目标, 利用模糊多目标规划<sup>[16]</sup>和遗传算法, 对联合系统进行容量优化配置。

### 3.1 经济性

系统总成本  $C$  衡量经济性, 即

$$C = C_{wf} + C_{pv} + C_{p1} + C_{p2} + C_{p3} + C_{ht} + C_{mt} \quad (9)$$

式中:  $C_{wf}$ 、 $C_{pv}$ 、 $C_{p1}$ 、 $C_{p2}$ 、 $C_{p3}$ 、 $C_{ht}$  和  $C_{mt}$  分别是系统、风场、光伏、小功率水泵、中功率水泵、大功率水泵、水电站和微燃机的成本, \$。

$$C_{wf} = C_{wf1} + C_{wf2} + C_{wf3} \quad (10)$$

$$C_{wf1} = n_w e_{wf} P_{wfn} \frac{r_{wf} (1 + r_{wf})^{m_{wf}}}{(1 + r_{wf})^{m_{wf}} - 1} \quad (11)$$

$$C_{wf2} = n_w P_{wfn} u_{wff} \quad (12)$$

$$C_{wf3} = E_{wf} u_{wfv} \quad (13)$$

式中:  $n_w$  是风机数量;  $e_{wf}$  是风机单位造价, \$/kW;  $P_{wfn}$  是风机额定功率, kW;  $r_{wf}$  是贴现率;  $m_{wf}$  是折旧年限;  $u_{wff}$  是风机固定运维成本, \$/kW;  $u_{wfv}$  是风机可变速运维成本, \$/kWh;  $E_{wf}$  是风机年发电量, kWh。系统其他组成部分的成本均按式(10)~式(13)的原理计算。

### 3.2 供电可靠性

负荷失电率  $LPSP$  衡量供电可靠性, 即

$$LPSP = \frac{\sum_{n=1}^{n_{max}} P_{lp}(n) \cdot 24 / n_{max}}{\sum_{n=1}^{n_{max}} P_{LS}(n) \cdot 24 / n_{max}} \quad (14)$$

式中:  $n_{max}$  表示将全天分成  $n_{max}$  个等时段;  $P_{lp}(n)$  是该天第  $n$  个时段平均弃荷功率, kW;  $P_{LS}(n)$  是该天第  $n$  个时段平均负荷, kW。

### 3.3 环保性

可再生能源渗透率  $\beta$  衡量环保性, 即

$$\beta = \frac{\sum_{n=1}^{n_{max}} P_r(n) \cdot 24 / n_{max}}{\sum_{n=1}^{n_{max}} P_{LS}(n) \cdot 24 / n_{max}} \quad (15)$$

$$P_r(n) = P_{r1}(n) - P_{r2}(n) \quad (16)$$

$$P_{r1}(n) = P_{wf}(n) + P_{pv}(n) + P_{ht}(n) \quad (17)$$

$$P_{r2}(n) = P_a(n) + P_{ps}(n) \quad (18)$$

式中,  $P_a(n)$  是该天第  $n$  个时段平均弃风弃光功率, kW。

### 3.4 可再生能源利用率

弃风弃光率  $A$  衡量可再生能源利用率, 即

$$A = \frac{\sum_{n=1}^{n_{max}} P_a(n) \cdot 24 / n_{max}}{\sum_{n=1}^{n_{max}} [P_{wf}(n) + P_{pv}(n)] \cdot 24 / n_{max}} \quad (19)$$

### 3.5 系统容量优化模型

利用模糊多目标规划将上述四个目标函数转化为联合满意度单目标函数<sup>[17]</sup>。

$$\mu = \alpha_1 \mu_1 + \alpha_2 \mu_2 + \alpha_3 \mu_3 + \alpha_4 \mu_4 \quad (20)$$

式中:  $\mu_1$ 、 $\mu_2$ 、 $\mu_3$  和  $\mu_4$  分别为  $C$ 、 $LPSP$ 、 $\beta$  和  $A$  的满意度;  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  和  $\alpha_4$  为基于偏好选择的满意度权重。

$$\mu_1 = \frac{C_{max} - C}{C_{max} - C_{min}} \quad (21)$$

$$\mu_2 = \frac{LPSP_{max} - LPSP}{LPSP_{max} - LPSP_{min}} \quad (22)$$

$$\mu_3 = \frac{\beta - \beta_{min}}{\beta_{max} - \beta_{min}} \quad (23)$$

$$\mu_4 = \frac{A_{max} - A}{A_{max} - A_{min}} \quad (24)$$

系统容量优化模型目标函数:

$$\min \{ \mu \} \quad (25)$$

其约束条件:

$$\begin{cases} 0 \leq n_w \leq n_{wmax} \\ 0 \leq n_{pv} \leq n_{pvmax} \\ 0 \leq n_{p1} \leq n_{p1max} \\ 0 \leq n_{p2} \leq n_{p2max} \\ 0 \leq n_{p3} \leq n_{p3max} \\ 0 \leq n_t \leq n_{tmax} \\ 0 \leq n_m \leq n_{mmax} \end{cases} \quad (26)$$

决策变量为  $n_w$ 、 $n_{pv}$ 、 $n_{p1}$ 、 $n_{p2}$ 、 $n_{p3}$ 、 $n_t$  和  $n_m$ 。利用遗传算法寻找系统最优解。

## 4 算例分析

以南麂岛(121.07°E, 27.46°N)为算例。图 6 为本文南麂岛联合系统交流结构图。

### 4.1 系统容量优化结果

对于上述每种调度策略, 先用第 3 节中的系统优化配置方法求出各自运行方式下的系统最佳容量配置。然后分析比较每种调度策略的最佳容量的运行结果。每种调度策略的基于模糊多目标规划和遗传算法的系统容量最佳配置如表 2 所示。对于每种调度策略, 采用其最佳容量配置后的系统运行总成

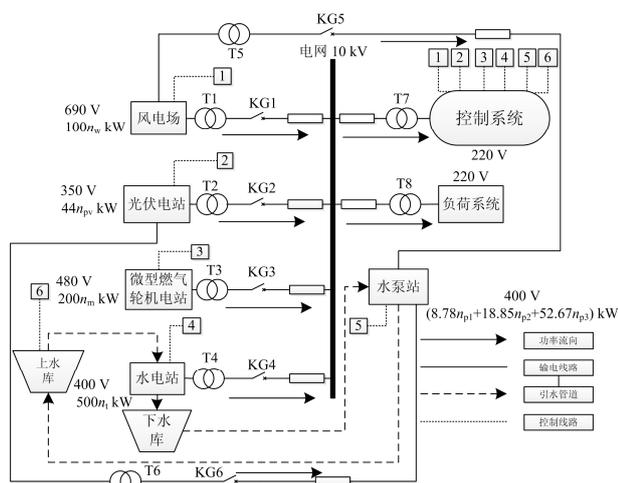


图 6 南麂岛联合系统的交流结构图

Fig. 6 AC structure of Nanji hybrid system

表 2 系统容量优化配置

Table 2 Optimization configuration of system capacity

		$n_w$	$n_{pv}$	$n_{p1}$	$n_{p2}$	$n_{p3}$	$n_t$	$n_m$
单一型调度	策略 1	5	12	2	2	15	2	5
	策略 2	5	12	1	2	10	1	4
	策略 3	5	12	1	2	9	1	3
一次复合型调度	策略 4	5	11	1	2	14	2	5
	策略 5	5	12	2	2	11	2	4
	策略 6	5	11	1	2	7	2	3
二次复合型调度	策略 7	5	12	2	2	13	2	5
	策略 8	5	12	1	2	14	2	4
	策略 9	5	11	2	2	12	2	5
	策略 10	5	1	2	2	1	2	3
	策略 11	5	12	2	1	10	2	4
	策略 12	5	12	1	2	10	2	3

本、负荷失电率、可再生能源渗透率和弃风弃光率分别如图 7(a)、(b)、(c)和(d)所示。

基于决策者经验, 权重  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  和  $\alpha_4$  分别取值 0.1、0.3、0.5 和 0.1, 故 12 种调度策略下的系统运行指标受可再生能源渗透率和负荷失电率影响较强, 受总成本和弃风弃光率影响较弱。

#### 4.2 3 种调度方法比较分析

##### 1) 风光直接渗透率的影响

如图 7, 无论是哪种调度方法, 总体情况是, 随着风光直接渗透率的提高, 系统经济性、环保性、可再生能源利用率提高, 而供电可靠性下降。

经济性提高主要是因为风光直接渗透率提高使更少风光输入水泵站, 系统对水泵站容量需求降低, 导致优化所得水泵站容量减小, 而负荷中由水

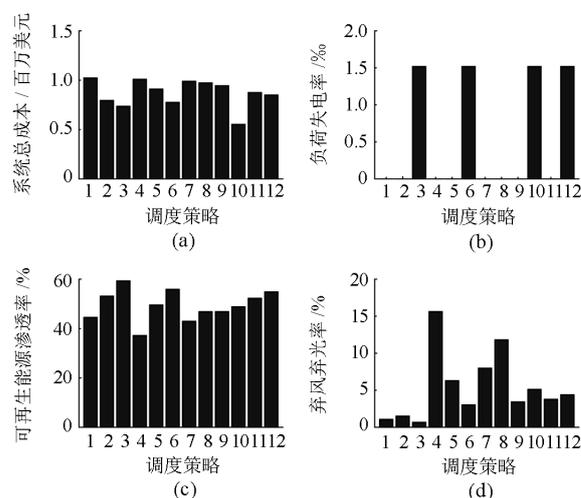


图 7 12 种调度策略下的优化系统运行指标比较

Fig. 7 Comparison of optimized operational indexes of the system under 12 kinds of dispatching strategies

电站和微燃机电站承担的比重减少, 系统对水电站和微燃机电站容量需求降低, 导致优化所得水电站和微燃机电站的容量减小(复合型调度的水电站容量不受此影响, 其容量由  $Z_{co}$  决定)。风光直接渗透率增加也使微燃机电站出力减小, 故降低燃料费用。因此, 系统经济性提高。

环保性和可再生能源利用率提高主要是因为风光大规模输入水泵站会导致水泵站消纳能力下降, 弃风弃光现象变严重, 可再生能源利用率降低, 故一定程度降低可再生能源渗透率。所以提高风光直接渗透率(直接供给负荷)有助于提高可再生能源渗透率和降低弃风弃光率。

供电可靠性降低原因如下: 第一, 对于单一型调度, 随着风光直接渗透率增加, 其输入水泵站的电能变少, 水泵站抽至上水库的水量减少, 故影响水电站的出力, 导致由于  $Z_u$  低于  $Z_{min}$  而使水电站停机时间较长, 且风光直接渗透率提高使优化所得微燃机电站出力减小, 故系统发生“负荷失电”概率增大; 第二, 对于复合型调度, 随风光直接渗透率的增加, 系统对微燃机电站的容量需求降低, 导致优化所得微燃机电站出力减小, 故模式 1 发生“负荷失电”概率增大。

##### 2) 一次复合型调度的分析

如图 7, 与单一型调度策略相比, 在其基础上所得一次复合型调度策略的经济性、环保性和可再生能源利用率总体更低, 供电可靠性不变。这主要是因为与单一型调度中的风光水优先、微燃机电站备用方式相比, 一次复合型调度中的“风+光+微燃”

与“风+光+水电”两种模式交替运行的方式会导致微燃机电站的出力增加，水电站的出力减少，可再生能源渗透率降低；系统燃料费增加，系统总成本增加；对水电站出力需求的降低，一定程度上导致对水泵站消纳风光需求的降低，故影响系统优化结果，使弃风弃光率增加，可再生能源利用率降低。

### 3) 二次复合型调度的分析

二次复合型调度策略保留一次复合型调度调控方便的优点。如图 7，通过将两种风光直接渗透率不同的一次复合型调度策略交叉结合，对于直接渗透率较低的一次复合型调度策略，可改善其经济性、环保性和可再生能源利用率；同时，对于直接渗透率较高的一次复合型调度策略，可提高其供电可靠性，但降低了其经济性、环保性和可再生能源利用率。主要原因是二次复合型调度策略同时受到两个一次复合型调度策略的影响，其运行指标会介于该两种一次复合型调度策略的运行指标之间。

另外根据运行指标，总体来看，二次复合型调度策略受其模式 1 对应的一次复合型调度策略的影响较大，而受其模式 2 对应的一次复合型调度策略的影响较小。

## 4.3 3 种调度方法总结

### 1) 3 种调度方法特点

单一型调度策略的经济性、供电可靠性、环保性和可再生能源利用率都较高，但调度任务繁重。一次复合型调度策略减轻调度任务，但也使系统经济性、环保性和可再生能源利用率变低。二次复合型调度策略可改善其对应的一次复合型调度策略，并保留一次复合型调度策略调度简单的优点。对于一次复合型调度策略 A，可利用其模式 1 与风光直接渗透率较高的一次复合型调度策略 B 的模式 2 组成二次复合型调度策略 C。这样既可改善策略 A 较差的运行指标，又可尽量减小对策略 A 较优运行指标的影响。

### 2) 最佳调度策略

如图 7，根据 4 个运行指标和调度等确定 12 种调度策略中的最佳策略。为保证用电可靠，策略 3、6、10 和 12 不考虑。单一型调度中，策略 2 的四个运行指标都最高，故其是单一型调度中最好的。一次复合型调度中，策略 5 的 4 个运行指标都最高，故其是一次复合型调度中最好的。虽然策略 5 的经济性、环保性和可再生能源利用率均比策略 2 略低，但其调度方便是明显优势。在二次复合型调度中，策略 11 的经济性和环保性都最好，可再生能源利用率仅次于策略 9，综合分析，策略 11 是二次复合型调度中最好的。与策略 5 相比，策略 11 不仅同样有

调度优势，且在经济性、环保性和可再生能源利用率方面表现更好。

综上所述，二次复合型调度的策略 11 是最佳调度策略。

## 5 结论

本文研究了海岛联合发电系统的调度问题，搭建了适于海岛电网的风-光-海水抽蓄联合发电模型，提出了“单一型调度”、“一次复合型调度”和“二次复合型调度”等调度方法。并以南麂岛为例，分析风光直接渗透率对调度的影响以及 3 种调度方法的优缺点，讨论选取了最佳调度策略。本文提出的联合系统运行模型对海岛发电系统的发展具有一定指导意义。

## 参考文献

- [1] 赵书强, 刘大正, 谢宇琪, 等. 基于相关机会目标规划的风光储联合发电系统储能调度策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 30-36.  
ZHAO Shuqiang, LIU Dazheng, XIE Yuqi, et al. Scheduling strategy of energy storage in wind-solar-battery hybrid power system based on dependent-chance goal programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 30-36.
- [2] 马静, 石建磊, 李文泉, 等. 基于功率多频率尺度分析的风光水气储联合系统日前调度策略[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1491-1498.  
MA Jing, SHI Jianlei, LI Wenquan, et al. A day-ahead dispatching strategy for power pool composed of wind farms, photovoltaic generations, pumped-storage power stations, gas turbine power plants and energy storage systems based on multi frequency scale analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1491-1498.
- [3] 李东东, 徐连连, 刘翔, 等. 考虑可削减负荷参与的含风光储微网经济优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 35-41.  
LI Dongdong, XU Lianlian, LIU Xiang, et al. Optimal dispatching of microgrid considering the participation of reducible loads, distributed generators (DG) and energy storage units[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 35-41.
- [4] 吴克河, 周欢, 黄婷, 等. 变权重系数和关联规则挖掘方法在风光储运行优化中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 50-57.  
WU Kehe, ZHOU Huan, HUANG Ting, et al. Application of variable weight coefficients and association rules in wind-solar-battery power plant operation optimization[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18):

- 50-57.
- [5] 杨秀, 陈洁, 朱兰, 等. 基于经济调度的微网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 53-60.  
YANG Xiu, CHEN Jie, ZHU Lan, et al. Optimization allocation of energy storage for microgrid based on economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 53-60.
- [6] 杨晓东, 陈宇, 张有兵, 等. 考虑交互功率与可再生能源功率波动的微电网调度优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 30-38.  
YANG Xiaodong, CHEN Yu, ZHANG Youbing, et al. Scheduling optimization model for microgrid considering interactive power and renewable energy output fluctuation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 30-38.
- [7] 王先齐, 汤泽琦. 基于分时电价机制的并网型微网多目标动态优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 9-18.  
WANG Xianqi, TANG Zeqi. Multiobjective dynamic optimal dispatching of grid-connected microgrid based on TOU power price mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 9-18.
- [8] 张元, 郝丽丽, 戴嘉琪, 等. 风电场等值建模研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 138-146.  
ZHANG Yuan, HAO Lili, DAI Jiaqi, et al. Overview of the equivalent model research for wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 138-146.
- [9] 王炳忠. 太阳能辐射计算[J]. 太阳能, 1999(4): 12-13.  
WANG Bingzhong. The formula of solar radiation[J]. Solar Energy, 1999(4): 12-13.
- [10] 冯巍, 董宏, 杨柳, 等. 太阳辐射直散分离模型比较研究—以北京地区为例[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(1): 12-17.  
FENG Wei, DONG Hong, YANG Liu, et al. Comparison of the fraction model of direct and diffuse solar radiation—taking Beijing area as an example[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(1): 12-17.
- [11] 李安定. 太阳能光伏发电系统工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [12] 任岩. 风-光-抽蓄复合发电系统的建模与优化研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [13] DIAMILA R, ERNEST M, 杨立永, 等. 光伏发电系统的优化—建模、仿真和控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [14] 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.
- [15] BUENO C, CARTA J A. Technical-economic analysis of wind-powered pumped hydrostorage systems part II: model application to the island of El Hierro[J]. Solar Energy, 2005, 78(3): 396-405.
- [16] 夏澍, 顾劲岳, 葛晓琳, 等. 风光联合优化配置的多目标机会约束规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 35-40.  
XIA Shu, GU Jinyue, GE Xiaolin, et al. Multiobjective chance-constrained programming method for wind generations and photovoltaic allocating[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 35-40.
- [17] 张新松, 礼晓飞, 王运, 等. 不确定性环境下考虑弃风的电力系统日前调度[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 75-82.  
ZHANG Xinsong, LI Xiaofei, WANG Yun. Day-ahead dispatching in consideration of wind power curtailments in uncertain environments[J]. Power System Protection and Control, 43(24): 75-82.
- 
- 收稿日期: 2017-01-05; 修回日期: 2017-06-16  
作者简介:  
曹宇(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为可再生能源建模、控制与优化。E-mail: 18012281906@163.com
- (魏小丽)