

文章编号:1671-6833(2019)05-0072-07

# 基于风电可调节不确定代价的风光柴储联合优化调度

薛金花<sup>1</sup>, 王德顺<sup>1</sup>, 郁正纲<sup>2</sup>, 李 红<sup>2</sup>, 朱信舜<sup>3</sup>, 窦春霞<sup>4</sup>

(1.中国电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 210009; 2.国网江苏省电力有限公司连云港供电分公司, 江苏 连云港 222000; 3.南京南瑞继保工程技术有限公司, 江苏 南京 210009; 4.南京邮电大学 先进技术研究院, 江苏 南京 210023)

**摘 要:**针对孤岛微电网中间歇式能源出力的不确定性问题,基于可调节风电的不确定代价,考虑蓄电池储能系统和柴油发电机组的控制特性.在系统稳定供电的前提下,以系统运维成本、污染物排放量为目标,引入可调负荷充放电等相关约束,建立孤岛微电网能量优化调度模型,优化储能充放电与柴油机组出力.并在此基础上,利用改进粒子群算法对模型进行求解,根据所建模型三种情景对比,进一步分析9个不同调度区间系数对调度结果的影响机理,算例仿真验证了可调节风电不确定代价优化模型和优化方法的有效性和可行性.

**关键词:** 孤岛微电网; 不确定代价; 蓄电池储能系统; 优化调度; 粒子群算法

**中图分类号:** TM615 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2019.05.006

## 0 引言

随着间歇性能源的快速发展,孤岛微电网供电侧与用电侧因风光能源出力不确定以及负荷需求波动而无法达到完全适配<sup>[1]</sup>,所以必须配备可控分布式能源(如柴油发电机组、蓄电池储能系统)对微电网进行整体调控.柴油发电机组主控是传统的微电网维稳方法,能够平衡变化幅度较大的系统净负荷波动,实现系统频率的无差控制,但反应时间较长.蓄电池主控是近期主流的微电网维稳方案,可在短时间内对小幅随机净负荷波动做出应对,提高独立微电网系统的瞬态频率响应特性和频率质量,但稳定性较差<sup>[2-3]</sup>.故将柴油发电机组和蓄电池储能系统结合组成混合控制系统,优势互补,更好地给微电网提供所需电能.

当前,世界各国专家对单一分布式能源主控策略做了一定的研究,但对于混合控制系统的研究还比较少.文献[4]给出了一个小功率离

网型风光柴储混合发电系统模型,根据气象条件、蓄电池荷电状态的变化,合理调节能量流动、分配各功率模块的功率输出.文献[5]提出了以蓄电池储能水平为纽带的多时间尺度能量优化调度方案.文献[6]采用基于 well-being 模型的蒙特卡罗模拟法评估风光柴储小型孤立发电系统的可靠性,通过满足“等效净负荷”的需求达到可再生能源出力利用率最高的目标.文献[7]根据储能系统在不同运行模式下的功能定位,提出了一种基于 SOC 状态的微电网能量优化调度策略,以保证日前调度的时效性.

笔者以柴油发电机组和蓄电池组混合控制系统作为风光互补微电网的主控系统和能量调节装置.在综合考虑可再生电源出力不确定的基础上,结合系统运维成本及燃料成本,提出了基于可调节风电不确定代价的孤岛微电网调度策略.并据此建立仿真模型,通过多个仿真实验结果对比,证明该策略可有效提高系统的可靠性与经济性.

**收稿日期:** 2019-01-11; **修订日期:** 2019-04-07

**基金项目:** 国家自然科学基金重点资助项目(61533010); 国家自然科学基金青年基金(61503199, 61503193); 国网江苏省电力有限公司科技项目; 江苏省自然科学基金青年基金(BK20150853); 电力电子变压器研制及其在配电网的示范应用(J2017140)

**作者简介:** 薛金花(1984—),女,江苏人,中国电力科学研究院高级工程师,主要从事储能的技术和经济性分析研究, E-mail: xuejinhua@epri.sgcc.com.cn.

**通信作者:** 窦春霞(1967—),女,南京邮电大学教授,博导,研究方向为新能源控制技术、微电网控制、神经网络、自适应控制等, E-mail: cxdou@ysu.edu.cn.

## 1 风光互补微电网模型

风光互补微电网模型利用风能、光伏发电互补与储能单元结合来提高微电网供电的可靠性和安全性<sup>[8]</sup>.风光互补微电网结构如图1所示.

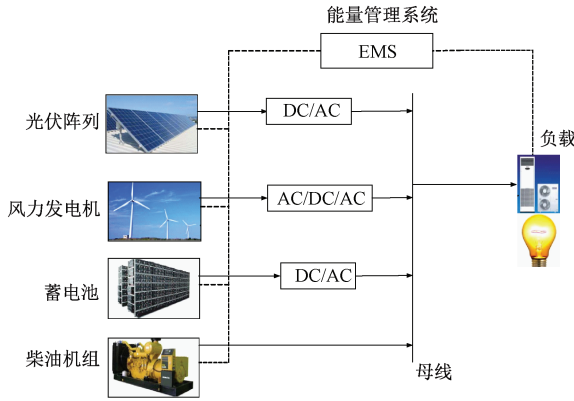


图1 风光柴储微电网结构图

Fig.1 Scenery diesel storage micro grid structure

### 1.1 光伏发电单元建模

光伏系统的输出功率跟辐照强度和空气温度等有紧密关系<sup>[9]</sup>,光伏出力公式为:

$$P_{pv} = \alpha_{pv} R_{pv} \frac{L_n}{L_s} [1 + \lambda (T_l - T_s)], \quad (1)$$

式中:  $P_{pv}$  为光伏出力;  $\alpha_{pv}$  为光伏阵列的功率因素;  $R_{pv}$  为光伏阵列总电阻;  $L_n$  和  $L_s$  分别代表此刻和标准状态下的光照强度;  $\lambda$  为温度系数;  $T_l$  和  $T_s$  分别为当前时刻、标准状态下光伏阵列表面温度.

### 1.2 风力发电单元建模

风机捕获的风能及风机轴上输出的机械功率分别为<sup>[10]</sup>:

$$P_w = \frac{1}{2} C_p \rho \pi r^2 v^3, \quad (2)$$

$$P_{mech\_opt} = 0.5 C_{pmax} \rho \pi r^2 \left( \frac{\omega_{wt} r}{\lambda_{opt}} \right)^3, \quad (3)$$

式中:  $P_w$  为风机捕获的风能;  $C_p$  为风能利用效率;  $\rho$  为空气密度;  $r$  为风机叶片半径;  $v$  为风机捕获风速;  $P_{mech\_opt}$  为风机轴上产生的机械功率;  $C_{pmax}$  为最大风能利用率系数;  $\omega_{wt}$  为风机转速;  $\lambda_{opt}$  为最佳叶尖速比.

### 1.3 柴油机组建模

(1) 油耗关系.柴油发电机组耗油量  $F$  与其输出功率  $P_d$  之间函数关系为<sup>[11]</sup>:

$$F = F_s Y_d + k P_d, \quad (4)$$

式中:  $F_s$  为柴油机组单位功耗;  $Y_d$  为柴油机组额定功率;  $k$  为柴油机组燃料取消斜率.

(2) 成本函数.柴油发电机的耗能特性函

数为:

$$f(P_d) = \alpha_d P_d^2 + \beta_d P_d + \xi_d, \quad (5)$$

式中:  $f(P_d)$  为柴油机组小时燃料费;  $\alpha_d$ 、 $\beta_d$  和  $\xi_d$  均为柴油机组的费用系数.

### 1.4 蓄电池储能系统建模

蓄电池储能系统运营成本模型如下:

$$F_{bat} = \sum_{m=1}^N \left( \frac{E_{bat}}{\eta} \times c_e \times \omega_m \right), \quad (6)$$

式中:  $F_{bat}$  为储能运维成本;  $N$  为储能寿命年限;  $m$  为储能使用年份;  $E_{bat}$  为储能额定容量;  $\eta$  为储能转换效率,且  $0 \leq \eta \leq 1$ ;  $c_e$  为储能单位容量投资成本;  $\omega_m$  为储能年运维成本占投资成本的比例.

### 1.5 负荷模型

微电网中负荷可分为固定负荷和可调负荷,间歇性能源无法满足负荷需求时微电网优先给固定负荷供能,同时削减可调负荷.

本文涉及的可调负荷以合约形式允许供电公司有偿地削减可调负荷的负荷需求,可调负荷补偿成本模型如下:

$$\begin{cases} C_{adj} = \gamma_{adj} P_{adj}(t) \Delta t \\ P_{adj}(t) = \eta P_{load}(t) \end{cases}, \quad (7)$$

式中:  $C_{adj}$  为孤岛微电网运行时可调负荷的补偿成本;  $\gamma_{adj}$  为供电公司对可调负荷单位功率的补偿电价,同时补偿电价为一定值且低于微电网向用户售电的电价;  $P_{adj}(t)$  为  $t$  时刻的可调负荷功率;  $\eta$  为可调负荷与总负荷量的占比.

## 2 孤岛微电网的能量调度建模

### 2.1 柴油机组配置

传统孤岛微电网系统的净负荷通过柴油机供能解决.然而,柴油机组的选择十分复杂,单台容量太小会频繁启动,增加运维成本;单台容量太大会因机组长期处于低功率输出而导致机组单位油耗比增大,降低柴油机组使用年限,因此,柴油机组的容量配置要进行适当优化<sup>[12]</sup>.

单台柴油机组最佳负荷率一般在 75%,此时既留有一定的功率裕度,经济性也相对较高;而最低负荷率通常在 25%~30%,若低于此下限,柴油机组单位油耗比增大,同时运行寿命降低<sup>[13]</sup>.

新能源发电系统一般在白天有较大的输出功率,且长时间内输出波动较小.考虑按额定功率将机组分为两组,大功率柴油机组的总功率最大值应略大于负荷上限,使得小功率柴油机组额定功率的 75%和大功率柴油机组额定功率 30%保持一

致,不仅优化了机组组合,减少燃料消耗和维护成本,微电网也有更大的调节裕度。

## 2.2 蓄电池下垂控制

蓄电池控制分为有功-频率控制( $P$ - $f$ 控制)和无功-电压控制( $Q$ - $U$ 控制),通常利用蓄电池的逆变器来实现;蓄电池逆变器通过控制 $d$ 轴电流分量快速响应外环的频率差( $\Delta f$ )信号,对蓄电池组的输出功率参考值( $P_{\text{ref}}$ )进行调控<sup>[14]</sup>。为了避免蓄电池频繁充放电,通常设定频率稳定区、输出上下值及锁定区。如图2所示,区域A为Droop控制的调节锁定区,系统频率在该区域内属于正常波动,蓄电池组不参加频率调节。结合上一章的研究,在更大频率差情况下,将频率调节交于柴油发电机组,蓄电池退出频率控制。 $BH$ 和 $BL$ 是蓄电池组频率调节区域, $DH$ 和 $DL$ 是柴油机组频率调节区域。

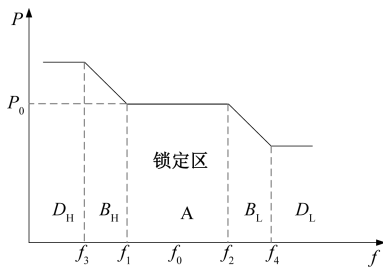


图2 微电源下垂控制特性图

Fig.2 Micro-power droop control characteristics

由此可知,基于蓄电池组 $P$ - $f$ 控制特性的改进函数如下式(8),式(10)为其Droop控制系数。

$$P_{\text{ref}} = \varphi_p \times (f_0 - f_m) + P_0, \quad (8)$$

$$f_m \in [f_3, f_1] \text{ or } [f_2, f_4], \quad (9)$$

$$\varphi_p = \frac{P_{\text{max}} - P_0}{f_0 - f_{\text{min}}}, \quad (10)$$

式中: $P_{\text{ref}}$ 为蓄电池组出力的参考值; $\varphi_p$ 是下垂控制系数; $f_0$ 为额定频率; $f_m$ 为实测频率; $P_0$ 为有功功率初始值; $P_{\text{max}}$ 、 $P_{\text{min}}$ 分别是蓄电池有功功率输出上、下限值。

## 2.3 系统能量调度策略

由于分布式能源的随机性、不可调度性等,柴油机组、电池储能系统可以充当系统备用能源,通过充放电对整个系统起到能量缓冲的作用。

$$\Delta P(t) = P_{\text{load}}(t) - \sum_{j=1}^{N_w} P_{\text{wj}}(t) - P_{\text{pv}}(t) - P_{\text{adj}}(t), \quad (11)$$

式中: $\Delta P(t)$ 为系统净负荷; $P_{\text{load}}$ 为负荷总需求量。

① $\Delta P(t) \leq 0$ ,新能源分布式电源发电功率过

剩,如果充电功率和剩余电量在蓄电池约束范围内,蓄电池组充电。当供电功率或剩余电量超出阈值时,蓄电池以最大限定功率 $P_{\text{cmax}}(t)$ 充能剩余能量通过卸荷元件消耗。

②新能源分布式电源发电功率不足,则有3种运行策略:一是当 $\Delta P(t) < P_{\text{cmax}}(t)$ 时,柴油机不启动,蓄电池组放电来补充不足;二是 $\Delta P(t) > P_{\text{cmax}}(t)$ 且与小功率柴油机组最佳负荷较为接近,启动小功率柴油机组且以最佳负荷工作,蓄电池组补充调节;三是 $P(t) > P_{\text{cmax}}(t)$ 且与大功率柴油机组最佳负荷较为接近,启动大功率柴油机组且以最佳负荷工作,蓄电池组补充调节<sup>[14]</sup>。当柴油机储能运行成本较高且负荷可调时,系统选择削减部分负荷来满足负荷平衡,此时可调负荷补偿成本要小于柴油机、储能运行工作成本。

## 2.4 目标函数

笔者以风光柴储的运维成本最小、柴油机燃料成本最小以及可调负荷的补偿成本最小为目标进行优化,转化公式如下:

$$\min C = \sum_{i=1}^N C_x \times \rho_{i,x}(P_{i,t}), \quad (12)$$

$$C_G = \sum_{i=1}^N CE_i(P_{i,t}), \quad (13)$$

$$C_{\text{OM}} = \sum_{i=1}^N P_{i,t} \times CO_i, \quad (14)$$

$$C_{\text{DP}} = \sum_{i=1}^N \frac{ADCC_i}{8760 \times cf_1 \times P_{g,i}}, \quad (15)$$

式中: $C_x$ 为各种成本; $\rho_{i,x}$ 为各成本比重; $P_{i,t}$ 为柴油机组的运维成本,元/h; $C_G$ 为柴油机组燃料消耗成本,元/h; $CE_i$ 为第 $i$ 个柴油机组燃料消耗成本,元/h; $C_{\text{OM}}$ 为运维成本,元/h; $CO_i$ 为运维系数,元/(kW·h); $C_{\text{DP}}$ 为耗损成本; $ADCC_i$ 为柴油机组输出功率上限制,具体公式如式(15)和式(16)所示; $cf_1$ 为容量因素; $P_{g,i}$ 为最大输出功率。

$$ADCC = IC_o \times cfr, \quad (16)$$

$$cfr = r - \frac{r}{(1+r)^m - 1}, \quad (17)$$

式中: $IC_o$ 为风电、光伏和蓄电池组的安装成本,元/kW; $cfr$ 为成本回收系数; $r$ 为收益率; $m$ 为发电单元使用年限。

微网环保性的最终目标是微网处理发电设备污染物费用 $C_2$ 最少,转化公式如下:

$$\min C_2 = \sum_{i=1}^N C_x \times \rho_{i,x}(P_{i,t}). \quad (18)$$

式中: $x$ 为污染物处理种类; $C_x$ 为处理该类污染物的成本,元/kg; $\rho_{i,x}$ 为输出单位电能时柴油机组排放的污染物,g/(kW·h)。

微网中可调负荷补偿成本,转化公式如下:

$$\min C_{\text{adj}} = \gamma_{\text{adj}} P_{\text{adj}}(t) \Delta t. \quad (19)$$

## 2.5 约束条件

功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} = P_{L,t} - P_{\text{Bat},t} - \sum_{j=1}^{N_w} P_{w_j,t} - P_{\text{pv},t}, \quad (20)$$

式中:  $P_{i,t}$  为  $t$  时刻的柴油机组出力;  $P_{L,t}$  为  $t$  时刻的负荷需求;  $P_{\text{Bat},t}$  为  $t$  时刻的蓄电池出力;  $P_{w_j,t}$  为  $t$  时刻的风电机组出力;  $P_{\text{pv},t}$  为  $t$  时刻的光伏出力。

微电源输出功率约束

$$\begin{cases} P_i^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_i^{\max} \\ \bar{P}_{w_j}(t) + \gamma_{w_j}(t) \bar{P}_{w_j}^{\min}(t) \leq P_{w_j}(t) \leq \bar{P}_{w_j}(t) + \gamma_{w_j}(t) \bar{P}_{w_j}^{\max}(t) \end{cases}, \quad (21)$$

式中:  $P_i^{\min}$ 、 $P_i^{\max}$  分别为各发电单元的最小、最大输出功率。

蓄电池荷电状态约束

$$\begin{cases} SOC_{\min} \leq SOC_t \leq SOC_{\max} \\ E_{t+1} = E_t + (P_{\text{pv},t} + P_{w,t} + P_{d,t} - P_{\text{load},t}) * \eta_c, \\ E_{t+1} = E_t - (P_{\text{pv},t} + P_{w,t} + P_{d,t} - P_{\text{load},t}) * \eta_d. \end{cases} \quad (22)$$

式中:  $SOC_{\min}$ 、 $SOC_{\max}$  分别为蓄电池最低、最高的荷电状态;  $E_t$  为  $t$  时刻蓄电池的容量;  $\eta_c$ 、 $\eta_d$  分别为充放电效率。笔者将  $SOC$  范围限定在  $[20\%, 80\%]$ , 即  $SOC_{\min} = 20\%$ ,  $SOC_{\max} = 80\%$ 。

爬坡率约束

$$\begin{cases} P_t - P_{t-1} \leq UR \\ P_{t-1} - P_t \leq DR \end{cases}, \quad (23)$$

其中,  $P_t$  为  $t$  时刻可控发电装置输出功率,  $UR$ 、 $DR$  分别是可控发电装置上升、下降出力限制。

可调负荷功率约束

为保证微网内用户体验、安全稳定运行,可调负荷功率不得超过总负荷量的 25%。

$$\begin{cases} \eta \leq \eta \leq \bar{\eta} \\ \eta P_{\text{load}}(t) \leq P_{\text{adj}}(t) \leq \bar{\eta} P_{\text{load}}(t) \end{cases}, \quad (24)$$

其中,  $\eta$ 、 $\bar{\eta}$  为可调负荷占总负荷量可调比重的上下限。

## 3 模型求解

笔者采用粒子群算法求解优化策略,算法从随机解出发,通过迭代不断追随当前搜索到的最优解来寻找全局最优值<sup>[15]</sup>,如图3所示。

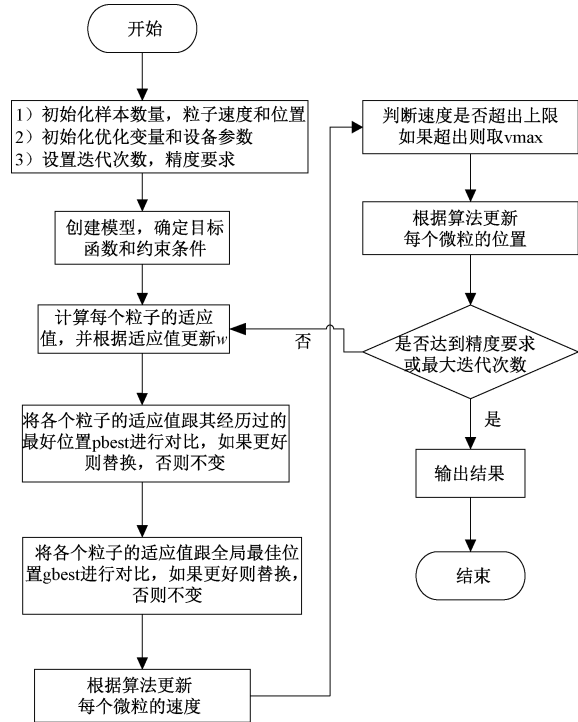


图3 基于粒子群算法的微电网控制策略流程图

Fig.3 Particle swarm optimization based microgrid control strategy flow

为了提升算法寻优速度,笔者对惯性权重进行动态更新<sup>[16]</sup>,更新公式可表示为:

$$w = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min}) \times k / \text{iter}_{\max}, \quad (25)$$

式中:  $w_{\max}$ 、 $w_{\min}$  分别为惯性权重上限、下限;  $\text{iter}_{\max}$  为迭代次数的上限。

## 4 算例分析

以某孤岛微电网为研究对象,主要包括 8 组 50 kW 光伏阵列,2 台 60 kW 风力发电机,容量为 400 kW·h 的蓄电池储能系统,一组总功率为 400 kW 的柴油机组<sup>[17]</sup>,一组总功率为 160 kW 的柴油机组,并选取一天二十四小时作为一个调度周期。表 1 是各分布式电源的维护和燃料成本系数。

表1 各分布式电源的维护和燃料成本系数

Tab.1 Maintenance and fuel cost factors for each distributed power supply

装置	维护费用/ (元·kW <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )	燃料成本/ (元·kW <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )
风力发电机	2.2	0
光伏阵列	2.2	0
柴油发电机	1.5	2

为充分利用可再生能源,笔者选取风速较低,日照强度充足的白天。仿真算例的光伏阵列以及风力发电机组按最大功率进行发电,分别在柴油

发电机组做主电源的无优化孤岛微电网、蓄电池做主电源的无优化孤岛微电网和基于笔者提出的能量调度孤岛微电网 3 种环境下进行对比仿真<sup>[18-19]</sup>,结果如图 4 所示。

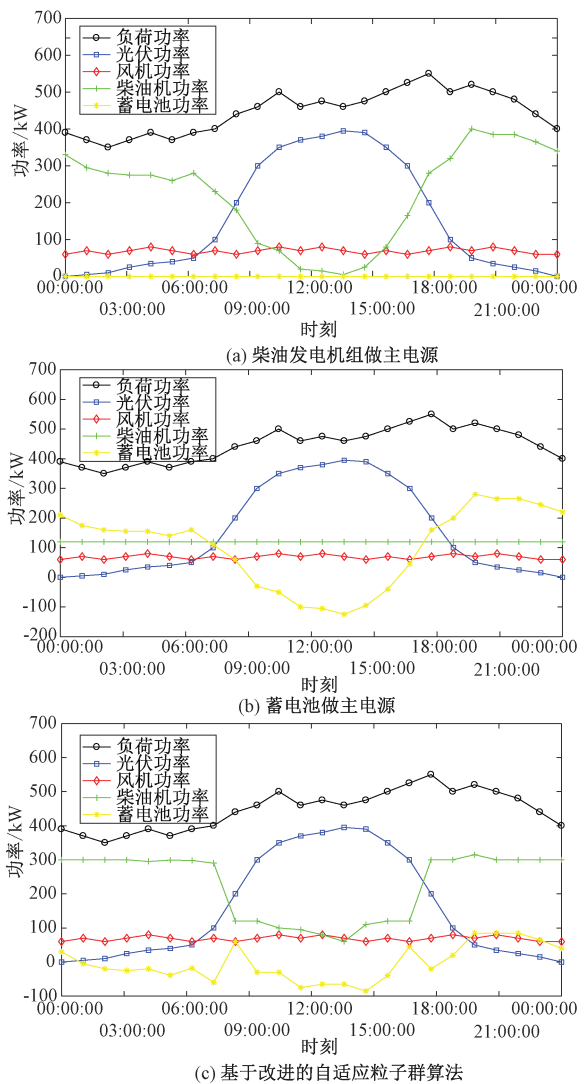


图 4 孤岛微电网能量管理模型仿真结果图  
Fig.4 Simulation results of an island microgrid energy management model

图 4(a) 中,当  $P_{DEpayload} = P_{Load} - P_{pv} - P_{SB} - P_{wt} > 0$  时,切除蓄电池系统,启动柴油机组应对系统净负荷平衡波动.当新能源发电系统总功率超出负荷需求时,柴油机组转入最低启停功率保证系统的频率电压稳定。

图 5 中,当  $P_{SB} = P_{Load} - P_{pv} - P_{DEpayload} - P_{wt} \neq 0$  时,利用蓄电池的放电来平衡系统的净负荷波动,蓄电池的出力功率随系统净负荷的波动而波动,此时柴油机组以最低负荷功率运行。

从图 4 可以看出,系统以柴油发电机组主控时,充分利用可再生能源蓄电池的“吞吐”特性来维持系统的稳定.从仿真来看,当新能源发电系统

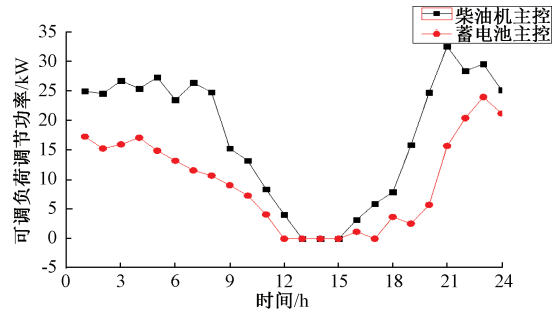


图 5 不同主控电源时可调负荷削减功率  
Fig.5 Adjustable load reduction power for different main control power supplies

输出功率不足时,柴油发电机组输出功率保持在 300 kW;当新能源发电系统输出功率充足时,柴油发电机组输出功率保持在 100 kW,波动起伏非常小.蓄电池的输入输出功率范围在 0~100 kW<sup>[19]</sup>,两组可控调节供电系统输出功率均比较稳定。

基于不同的不确定性预算要求,通过调整调度间隔系数获得不同间隔.通过求解鲁棒模型,在表 2 中列出了 9 种不确定性等级下包括燃料成本,不确定性预算和总输出违规功率的数据,几乎所有数据都按升序排列.当风电出力较大时,柴油机组输出减少,此时所耗费的燃料成本也随之降低;否则,燃料成本增加.总输出违规设置为 1.0 MW,当不同级别的违规不超过 1.0 MW 时,可以认为利用鲁棒优化方法处理约束条件的方法是可行的.在孤岛微网中,通过考虑间歇性能源的不确定性等级与经济性之间的比例关系,对实际运营有着重要的指导作用。

表 2 9 个调度区间系数与调度结果

Tab.2 Scheduling results with nine dispatch interval coefficients

不确定等级	燃料成本/元	$\Delta t$	违规功率/kW
1	251 735	0.0	0.977 6
2	251 305	0.5	0.971 0
3	251 089	1.0	0.963 5
4	249 120	1.0	0.961 4
5	247 983	2.0	0.957 8
6	247 056	2.0	0.952 3
7	246 833	3.0	0.946 5
8	246 354	3.0	0.941 1
9	245 583	4.0	0.936 9

如图 5 所示,两条曲线分别为柴油机和蓄电池主控时系统可调负荷的调节功率.分析可知,光伏夜间无法供电,且柴油机发电成本高于负荷补偿成本,此时选择削减可调负荷;白天光照

充足,可再生能源发电满足负荷需求且为获得更大收益,充分利用负荷消纳而蓄电池调度成本低于柴油发电机,故可调负荷曲线较柴油机主控时更低,此时微网内可再生能源消纳能力更高,弃光率更少,系统供电可靠性及稳定性更高。

在图6中,柴油发电机做主电源的无优化孤岛微电网的总成本为 $4.57 \times 10^4$ 元,柴油发电机组的燃料消耗较大,且长时间低功率运行会大大提高柴油发电机耗损,增加设备的损失.在蓄电池做主电源的无优化孤岛微电网中的总成本为 $4.12 \times 10^4$ 元,当新能源发电功率出现波动时,蓄电池充放电(深充深放)次数明显加剧.在实际工程中,蓄电池充放电深度与损耗成本呈指数关系,充放电深度越大,使用寿命越小,损耗成本越高,系统经济成本就越低.笔者提出的不确定成本代价的孤岛微电网能量调度策略中,柴油发电机组根据新能源发电功率及蓄电池充放阈值调整输出功率,并据此启停柴油机,避免了柴油机的频繁启停,使其保持在最佳负荷区间工作,单位油耗比、运维成本都得到大幅降低.同时蓄电池浅充浅放,其损耗成本也得到改善,此时系统总成本为 $3.91 \times 10^4$ 元。

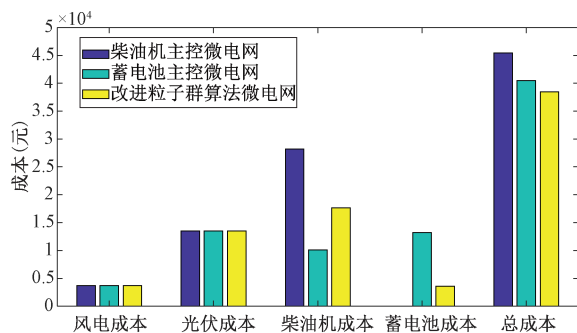


图6 3种模式下微电网的分布式电源发电成本对比图

Fig.6 Comparison of distributed power generation costs of microgrid in three different modes

图7是利用普通PSO算法进行优化求解,寻找到的全局最优值 fitness 为 $4.58 \times 10^4$ 元,此时迭代次数为185.图8为利用改进PSO算法求解得到整体最优解的曲线图,此时最优值 fitness 为 $3.91 \times 10^4$ ,迭代次数为158.对比两者的全局最优值和迭代次数可知,利用改进后的PSO算法进行优化,全局搜索能力和收敛速度方面有明显改善。

从仿真得到的结果来看,利用改进PSO算法优化本文中的孤岛微电网多目标成本问题,比未优化PSO算法得到的成本数值更低。

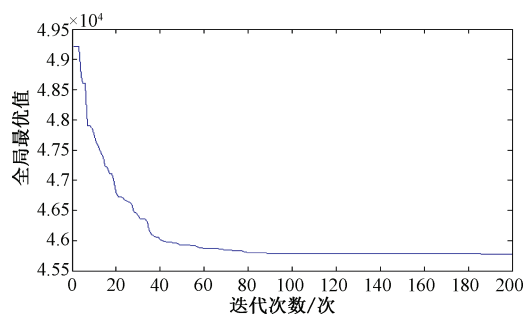


图7 普通粒子群算法的整体最佳解

Fig.7 The best solution of general particle swarm optimization

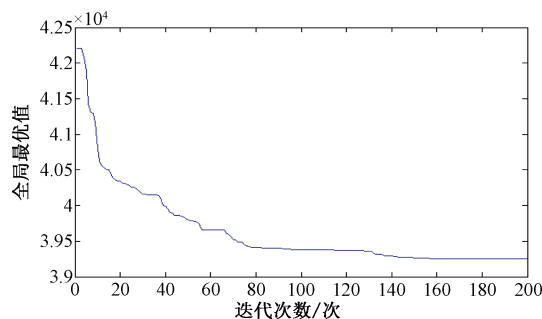


图8 改进粒子群算法的整体最佳解

Fig.8 The global optimal solution of the improved particle swarm optimization algorithm

## 5 结论

提出了基于可调节风电不确定代价的孤岛微电网调度策略,由于光伏、风电的不确定性带来不确定性成本问题,考虑蓄电池组快速调节特性以及柴油机发电缓慢的调节特性,建立了基于不同补偿功率的孤岛微电网频率分层控制,根据净负荷功率大小,利用蓄电池组处理变化幅度较小和变化周期较短的随机净负荷波动,使其保持在较小范围内,提高孤岛微电网系统的瞬态频率响应特性;利用柴油发电机应对变化幅度较大和变化周期较长的系统净负荷波动,以此控制频率的无差调节,保证系统充放电频率稳定.在3种不同情景下对微网系统优化模型进行对比,进一步分析9个不同调度区间系数对调度结果的影响机理,仿真结果验证了所提方法能够有效提高孤岛微电网供电的可靠性,同时保证系统运营的经济性。

## 参考文献:

- [1] 葛晓琳. 风光储混合发电系统优化设计与分析[J]. 上海电力学院学报, 2014, 30(4): 297-302.
- [2] 马艺玮, 杨苹, 陈思哲, 等. 含柴油发电机和蓄电池储能的独立微电网频率分层控制[J]. 控制理论与

- 应用, 2015, 32(8): 1098-1105.
- [3] 马艺玮, 杨苹, 吴捷. 含多分布式电源独立微电网的混合控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 103-109.
- [4] 陈斌, 殷慧兰, 胡洛瑄, 等. 基于 Matlab/Simulink 的风光柴储发电系统仿真[J]. 电气电子教学学报, 2013, 35(4): 84-88.
- [5] 李保恩, 李献伟, 毋炳鑫. 基于储能 SOC 状态的微电网能量优化调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 108-114.
- [6] 陈柔伊, 董旭柱, 黄邵远, 等. 孤岛微网系统柴发配置分析[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(10): 58-63.
- [7] 丁明, 杨向真, 苏建徽. 基于虚拟同步发电机思想的微电网逆变电源控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 89-93.
- [8] 时珊珊, 鲁宗相, 闵勇, 等. 微电源特性分析及其对微电网负荷电压的影响[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 68-71.
- [9] 赵波. 微电网优化配置关键技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [10] 李佳华, 马连博, 王兴伟, 等. 基于多目标蜂群进化优化的微电网能量调度方法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2018, 39(6): 50-58.
- [11] BINDNER H, CRONIN T, LUNDSAGER P, et al. Lifetime modelling of lead acid batteries [J]. Journal of Power Sources, 2005, 53(1): 111-117.
- [12] 杨瑞峰, 崔志琴. 大功率柴油机组合结构建模技术研究[J]. 内燃机工程, 2003, 24(3): 20-22.
- [13] 韩晓娟, 程成, 籍天明, 等. 计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 91-97.
- [14] 张宏春. 柴油机超负荷运转的危害及产生机理[J]. 中国设备工程, 2017(19): 56-58.
- [15] ZHANG L Y, ZHANG J B. Optimization research on the hybrid energy storage capacity of stand-alone wind/PV micro-grid based on improved PSO [J]. Power & Energy, 2016, 37(4): 471-475.
- [16] 陆亚南, 施泉生. 基于改进粒子群算法的含分布式发电配网孤岛划分[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(7): 17-23.
- [17] BASU M. Particle swarm optimization based goal-attainment method for dynamic economic emission dispatch[J]. Electric Power Components and Systems, 2006, 34(9): 1015-1025.
- [18] 阎新芳, 严晶晶, 冯岩. WSN 中基于梯度和粒子群优化算法的分簇算法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 33-36.
- [19] 李军徽, 冯爽, 崔新振, 等. 风储联合发电系统中锂电池寿命评估[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(10): 34-38.

## A Dispatching Strategy for Isolated Island Micro-grid Based on Adjustable Wind Power Uncertain Cost

XUE Jinhua<sup>1</sup>, WANG Deshun<sup>1</sup>, YU Zhenggang<sup>2</sup>, LI Hong<sup>2</sup>, ZHU Xinshun<sup>3</sup>, DOU Chunxia<sup>4</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210009, China; 2. State Grid Jiangsu Power Co., Ltd. Lianyungang Power Supply Branch, Lianyungang City, Jiangsu 222000, China; 3. Nanjing Nanrui Jibao Engineering Technology Co., Ltd, Nanjing, Jiangsu 210009, China; 4. Institute of advanced technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** To deal with the uncertainty of intermittent energy in the island microgrid model, based on the uncertain cost of adjustable wind power, this paper enquired the different control characteristics of battery energy storage system and diesel generator set, on the premise of ensuring stable power supply of the system, the optimized charge and discharge of energy storage and diesel unit output. And it introduced the adjustable load and other related constraints with the system cost and pollutant emission as the goal, and established the energy optimization scheduling model of the island microgrid. The related constraints such as adjustable load were introduced to establish an energy optimization scheduling model for the island microgrid. On this basis, the improved particle swarm optimization algorithm was used to solve the model. According to the comparative analysis of the micro-grid system optimization models under three different scenarios, the influence mechanism of nine different scheduling interval coefficients on the scheduling results was further analyzed. The effectiveness and feasibility of the wind turbine uncertain cost optimization model and optimization method were verified by case study.

**Key words:** island microgrid; uncertain cost; battery energy storage system; optimal scheduling; particle swarm optimization