

基于混合NSGA-II算法的基站电源 容量配置优化

陈金阳¹,雷勇¹,曹晓燕¹,何鑫¹,祝晓波²

(1.四川大学 电气工程学院,四川 成都 610065;

2.中国铁塔股份有限公司泸州市分公司,四川 泸州 646000)

摘要: 偏远地区5G通讯基站的运行功耗较大,风光新能源构成的基站供电系统可以很好地解决偏远地区电网难以接入的问题。新能源基站供电系统元件容量的选取对系统的稳定性和经济性均有重大影响。为实现稳定性和经济性的综合规划,以等价年金总成本和负荷缺电率最小化为目标函数,以蓄电池荷电状态、年污染物排放量等为约束条件建立容量配置优化模型,提出一种混合NSGA-II算法引入帕累托前沿的求解。针对传统NSGA-II算法初始群体选取较随意和拥挤度计算方法进行了相应改进,使得改进后的算法收敛性和帕累托前沿多样性有了较大提升。最后,利用改进后的混合NSGA-II算法对四川某实际通讯基站供电系统项目进行配置优化求解,验证了混合NSGA-II算法的有效性。

关键词: 5G通讯基站;混合NSGA-II算法;容量配置优化;帕累托前沿多样性

中图分类号: TM61 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd22969

Optimal Sizing of Base Station Power Supply Based on Hybrid NSGA-II Algorithm

CHEN Jinyang¹, LEI Yong¹, CAO Xiaoyan¹, HE Xin¹, ZHU Xiaobo²

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;

2. China Tower Co., Ltd. Luzhou Company, Luzhou 646000, Sichuan, China)

Abstract: The operation of 5G communication base stations in remote areas requires a lot of power. The base station power supply system composed of wind and solar new energy can well solve the problem of difficult access to the power grid in remote areas. The selection of the component capacity of the new energy base station power supply system has a significant impact on the stability and economy of the system. In order to realize the comprehensive planning of stability and economy, the objective function was established as the total cost of equivalent annuity and the load shortage rate and the capacity allocation optimization model was established with the constraints of battery state of charge and annual pollutant emissions, the optimization algorithm NSGA-II was proposed to find the solution of Pareto front. Corresponding improvements were made to the random and crowded comparison methods of the initial group selection of the original algorithm, which greatly improves the convergence of the improved algorithm and the uniformity of the Pareto front. Finally, the improved hybrid NSGA-II algorithm was used to optimize the configuration of an exemplary communication base station power supply system in Sichuan Province. The effectiveness of the hybrid NSGA-II algorithm was verified with the results of the calculation examples.

Key words: 5G communication base station; hybrid NSGA-II algorithm; optimal sizing; diversity of Pareto front

近年来,国家出台了一系列加快5G网络建设部署的政策,5G通讯基站功耗较4G大幅提升。我国偏远山区交通不便,市电难以接入或接入后由于自然环境恶劣易发生故障,这些地区往往风能和太阳能较充足。因此,如何通过合理的容量

配置优化,使得风光互补系统满足5G通讯基站供电要求成为了重要的研究课题。

针对风光互补系统的容量配置优化,国内外研究学者做了大量研究工作。文献[1]对某并网微电网,以最小化各元件全生命周期产生的成本

基金项目:四川省教育部科技项目(2018CDLZ-28)

作者简介:陈金阳(1995—),男,硕士,Email:250032559@qq.com

通讯作者:雷勇(1966—),男,博士,教授,Email:yong.lei@163.com

和最大化自供电率为目标函数,通过遗传算法求解各元件容量,实现了系统最优容量优化配置;文献[2]以位于沙特某市的风光柴储微电网为例,以可再生能源因子为约束条件,对外购市电成本和全年负荷缺电率(loss of power supply probability, LPSP)两目标函数进行最小化,提出了一种多目标自适应差分进化算法进行求解。但随着进化代数增加,存在后期收敛速度变慢、陷入局部最优等问题;文献[3]提出了一种基于系统成本的两步解析法,用凸优化方法确定微电网中各元件的最佳容量,证明了最优的容量选择能够兼顾系统稳定性和经济性。但凸优化方法对微电网建模需要精确的数学模型,且对于某些非凸约束的问题无法解决,鲁棒性较差;文献[4]以四川某地为例,设计并研究了带抽水蓄能电站的光伏/风电/水电混合能源系统,以技术经济型指标为约束条件,将最大供电可靠性和投资成本两个目标函数进行加权求和转化为单目标优化问题,求解了最佳容量配置。但该方法权重因子的选择经验性较强,难以兼顾各个目标函数的相对重要程度。

目前,如非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)等演化算法由于易于实现、鲁棒性好、适用性广等优点被广泛用于多目标容量配置优化问题中^[5]。NSGA-II算法基于快速非支配排序方法,大大降低了计算复杂度,并引入拥挤度的概念提升帕累托前沿的多样性^[6]。近几年众多学者将其用于微电网多目标容量配置优化研究。文献[7]基于不同气候的电气负荷曲线,考虑组件安装面积和上网电价约束,利用NSGA-II算法得到最小经济成本和环境成本的帕累托解集;文献[8]计及微电网母线的最大短路电流限制,通过NSGA-II算法适当分配微源的容量和位置,大大减少了限流器的尺寸;文献[9]对风力发电机定期生成相邻区域不同风电场的维护计划和资源分配的动态需求,采用NSGA-II算法进行组合优化,得到最小化运维成本和惩罚成本的帕累托前沿;文献[10-13]建立以有功平衡、节点电压偏差、分布式能源渗透率等为约束,投资成本、网损等为多目标函数的容量配置优化模型,并使用NSGA-II算法求解。

上述的研究中使用的NSGA-II算法中初始种群均为随机生成,未考虑初始种群对算法收敛性的影响,且拥挤度的定义尚未完善,可能使多样性好的个体被剔除。本文提出一种利用蜜蜂

算法生成初始种群作为输入进入算法流程,然后用动态拥挤度改进传统算法的多样性排序的混合NSGA-II算法对四川某实际示范性通讯基站供电系统项目进行容量配置,验证算法的有效性。

1 系统结构与功率分配

1.1 项目概况

四川某通讯基站供电系统由光伏板、风力发电机、蓄电池、柴油机、卸荷器等元件构成,如图1所示。系统总负荷分为直流负荷和交流负荷,直流负荷主要来自通讯基站射频功率,交流负荷主要来自用于为基站组件散热的空调器件。光伏板和风力发电机联合向系统供电,蓄电池用于平抑功率。若风光功率较低且蓄电池能量低于阈值时,柴油发电机作为备用电源向系统供电。

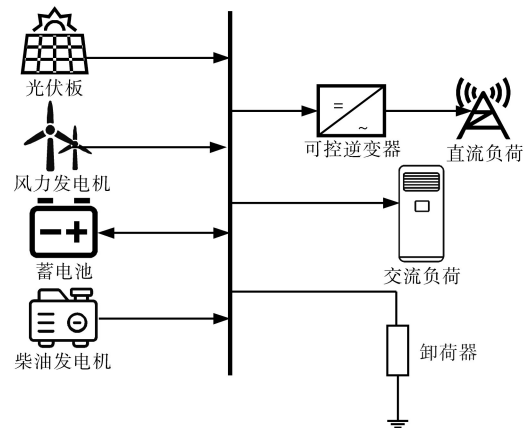


图1 基站供电系统结构图

Fig.1 Diagram of base station power supply system

1.2 系统元器件模型

1.2.1 光伏板模型

由环境温度推算光伏板元件温度,如下式:

$$T_{mod} = T_{amb} + 0.0256G \quad (1)$$

式中: T_{mod} 为光伏板元件温度; T_{amb} 为环境温度; G 为太阳辐照度。

光伏板输出功率可以表示为太阳辐照度和光伏板元件温度的函数,即

$$P_{PV} = P_{PV}^r G [1 + K_t(T_{mod} - T_{ref})] / G_{ref} \quad (2)$$

式中: P_{PV} , P_{PV}^r 分别为光伏板输出功率和额定功率; K_t 为功率温度系数; T_{ref} 为参考温度,值为25℃; G_{ref} 为参考辐照度,大小为1000 W/m²。

1.2.2 风力发电机模型

对风力发电机,当风速超过切入风速时,风机开始运行;当风机超过了额定风速,风机以额定功率发电;当风机超过了切出风速,风机停运。风力发电机输出功率与风速的关系如下:

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & v \leq v_{ci} \text{ 或 } v \geq v_{co} \\ P_{WT}^r \frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} & v_{ci} < v < v_r \\ P_{WT}^r & v_r < v < v_{co} \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_{WT} , P_{WT}^r 分别为风机功率和风机额定功率; v , v_{ci} , v_{co} , v_r 分别为风速、切入风速、切出风速和额定风速。

1.2.3 蓄电池模型

风机和光伏组件产生的多余电能存储在蓄电池组中,并且当微源功率不足时,将从电池中提取能量。荷电状态(SOC)通常用于确定电池的充电和放电状态。蓄电池充/放电瞬时SOC计算公式如下:

$$SOC_c(t) = (1 - \delta)SOC_c(t - 1) + P_c \Delta t \eta_c / E_c \quad (4)$$

$$SOC_d(t) = (1 - \delta)SOC_d(t - 1) - \frac{P_d \Delta t}{E_c \eta_d} \quad (5)$$

式中: $SOC_c(t)$, $SOC_c(t - 1)$, $SOC_d(t)$, $SOC_d(t - 1)$ 分别为第 t 个时间段末和第 $t-1$ 时间段末蓄电池充、放电的荷电状态; δ 为蓄电池自放电率; η_c 为蓄电池充电效率; η_d 为蓄电池放电效率; P_c , P_d 分别为蓄电池充电功率和放电功率,kW; E_c 为蓄电池额定容量,kW·h。

1.2.4 柴油发电机模型

柴油发电机为基站供电系统的备用电源,柴油发电机油耗与输出功率关系式如下:

$$F(t) = \alpha P_{die}^r + \beta P_{die} \quad (6)$$

式中: $F(t)$ 为单位小时的燃油消耗量,L/h; P_{die}^r , P_{die} 分别为柴油发电机的额定功率、输出功率,kW; α , β 为燃料曲线系数,L/(kW·h)。

1.2.5 负荷模型

通讯基站内负荷由交流负荷和直流负荷组成,公式如下:

$$P_L(t) = P_{AC}(t) + P_{DC}(t) \quad (7)$$

式中: $P_{AC}(t)$ 为交流负荷功率; $P_{DC}(t)$ 为直流负荷功率; $P_L(t)$ 为负荷总功率。

交流负荷包括空调、照明器件等,直流负荷包括基站收发台等通讯器件。

1.3 系统功率分配

风力发电机和光伏板是基站电源系统优先的供电电源,柴油发电机起备用电源的作用。当风光电力充足时,除满足负荷需求外,剩余功率为蓄电池充电,仍有盈余时通过卸荷器释放多余能量。当风光电力不足时,蓄电池放电补足缺额功率,仍有不足则启动柴油发电机供电。功率分

配策略尽可能利用风能和光能,实现系统自主运行并减少柴油机启停产生的污染物排放。

将1 a分为8 760 h,假定每个采样时间段内功率恒定,定义第 t 个时间段内,风光系统功率与负荷功率差为额外功率 ΔP ,计算方式如下:

$$\Delta P(t) = P_{WT}(t) + P_{PV}(t) - P_L(t) \quad (8)$$

式中: $P_{WT}(t)$, $P_{PV}(t)$ 分别为第 t 个时间段内风力发电机功率和光伏板功率。

1)若 $\Delta P(t) = 0$,则微源发电刚好满足负荷功率,蓄电池和柴油发电机不运行;

2)若 $\Delta P(t) > 0$,则微源功率除满足负荷需求外,额外功率对蓄电池进行充电,但当蓄电池达到最大荷电状态 SOC_{max} 时,为了防止过充,多余能量通过卸荷器释放;

3)若 $\Delta P(t) < 0$,则微源功率不能满足负荷需求,此时蓄电池放电,补足功率差额,但当蓄电池达到最小荷电状态 SOC_{min} 时,为防止过放,启动柴油发电机供电。

工程中蓄电池SOC范围为0.2~0.8,系统功率分配方式如图2所示。

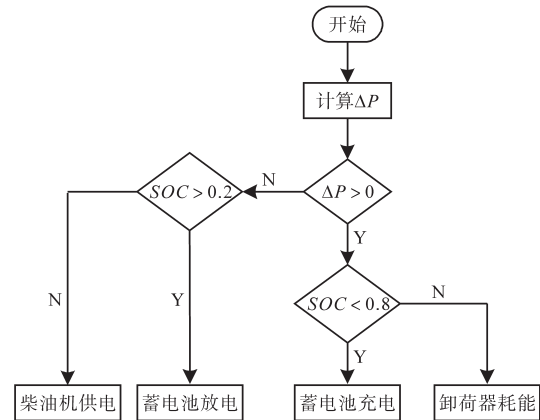


图2 基站供电系统功率分配方式

Fig.2 Power distribution mode of base station power supply system

2 容量配置优化模型

2.1 目标函数

对于通讯基站供电系统,组件容量大小的选取对系统经济性、可靠性有重要意义。以风机发电机、光伏板、蓄电池、柴油发电机的数量为控制变量,最小化等价年金总成本和负荷缺电率两个目标函数以兼顾系统的经济性和稳定性。

2.1.1 等价年金总成本

等价年金总成本 C_{TAC} 包括年投资成本 C_{acpt} 、年维护成本 C_{amln} 、年替换成本 C_{arep} 、年燃料成本 C_{afuel} ,即

$$C_{TAC} = C_{acpt} + C_{amtn} + C_{arep} + C_{afuel} \quad (9)$$

考虑现金贴现,定义资本回收系数如下:

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (10)$$

式中: i 为贴现率,取6%; n 为项目的寿命周期。

蓄电池在项目周期内因其寿命较短需多次更换,定义一次支付现值因子如下:

$$SPPWF = \sum_{j=1}^{n/n_{bat}} \frac{1}{(1+i)^{(j-1)n_{bat}}} \quad (11)$$

式中: n_{bat} 为蓄电池寿命。

蓄电池现值如下:

$$C_b = P_b \times SPPWF \quad (12)$$

式中: P_b 为蓄电池原价; C_b 为蓄电池计及微网寿命内周期性替换的年成本。

由此得到项目年投资成本如下:

$$C_{acpt} = CRF \cdot (n_w C_w + n_p C_p + n_b C_b + n_d C_d) \quad (13)$$

式中: n_w, n_p, n_b, n_d 分别为系统风力发电机、光伏板组件、蓄电池和柴油发电机的数量; C_w, C_p, C_b, C_d 分别为风力发电机、光伏板组件、蓄电池和柴油发电机的单价。

年维护成本包括对系统微源和柴油发电机的检修保养成本,计算公式为

$$C_{amtn} = n_p C_{amtn}^p + n_w C_{amtn}^w + n_d C_{amtn}^d \quad (14)$$

式中: $C_{amtn}^w, C_{amtn}^p, C_{amtn}^d$ 分别为风力发电机、光伏板组件和柴油发电机的年维护成本。

由于蓄电池在较短周期内更换,不计其维护成本。

系统的年替换成本是在组件寿命期内发生的所有更换成本的和。工程中只有电池在系统的使用寿命内需要定期更换,因此年替换成本如下式:

$$C_{arep} = n_b \times C_b \quad (15)$$

年燃料成本为柴油发电机一年所耗柴油的购买费用:

$$C_{afuel} = L_D \sum_{t=1}^{8760} F(t) \Delta t \quad (16)$$

式中: L_D 为柴油单价,取5.95元/L。

本文中的示范工程单个元件的型号已选定,因此供电系统元件的数量确定时,风机、光伏板等组件的容量也随之确定,转换如下:

$$\begin{cases} S_{PV} = n_p \cdot P_{PV}^r \\ S_{wind} = n_w \cdot P_{WT}^r \\ S_{die} = n_d \cdot P_{die}^r \\ S_{bat} = n_b \cdot E_C \end{cases} \quad (17)$$

式中: S_{PV} 为光伏板总容量,kW; S_{wind} 为风力发电机总容量,kW; S_{die} 为柴油发电机总容量,kW; S_{bat} 为蓄电池总容量,kW·h。

2.1.2 负荷缺电率(LPSP)

负荷缺电率表征系统内给定时域内微源功率无法满足负荷功率的概率,其计算公式如下:

$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^T DE(t)}{\sum_{t=1}^T P_L(t) \Delta t} \quad (18)$$

式中: T 为年采样小时总长; $DE(t)$ 为微源较负荷功率的缺额; Δt 为采样周期。

$LPSP$ 值越小,代表系统可靠性越高。

2.2 约束条件

1) 蓄电池荷电状态/充放电约束如下:

$$0.2 < SOC < 0.8 \quad (19)$$

$$\begin{cases} 0 < P_c(t) < P_{c,max} \\ 0 < P_d(t) < P_{d,max} \end{cases} \quad (20)$$

2) 柴油发电机输出功率约束如下:

$$0 \leq P_{die}(t) \leq P_{die}^r \quad (21)$$

3) 环境保护约束。基站供电系统应当最大限度地利用风光能源,为了减少柴油发电机启停导致的环境污染,应对柴油发电机废气排放量进行约束,如下式:

$$W_{em} = \sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^T \beta_k P_{die}(t) \Delta t \leq W_{em,max} \quad (22)$$

式中: W_{em} 为柴油机年污染物排放量,kg; m 为污染物种类; β_k 为不同污染物的排放系数,kg/(kW·h); $W_{em,max}$ 为年柴油机最大允许污染物排放量,kg。

3 容量配置优化模型求解算法

模型采用混合NSGA-II算法求解多目标优化的帕累托解。针对原方法初始种群产生较随机可能影响算法收敛速度的问题,先用蜜蜂算法为NSGA-II算法生成初始种群。另外,在NSGA-II算法运行过程中,使用改进的动态拥挤度排序,防止良好多样性的个体被丢弃,由此提高帕累托前沿的多样性。算法流程图如图3所示。

3.1 初始种群的生成

初始种群对算法的收敛有重要的作用,合理分布的初始群体可以提高算法收敛速度和鲁棒性,加快多目标优化算法收敛到真实帕累托前沿的速度,且避免过早陷入局部最优^[14]。

蜜蜂算法是由Pham等人引入的基于总体的

优化算法^[15]。蜜蜂算法模仿了蜜蜂的觅食策略,以寻找优化问题的最优解。

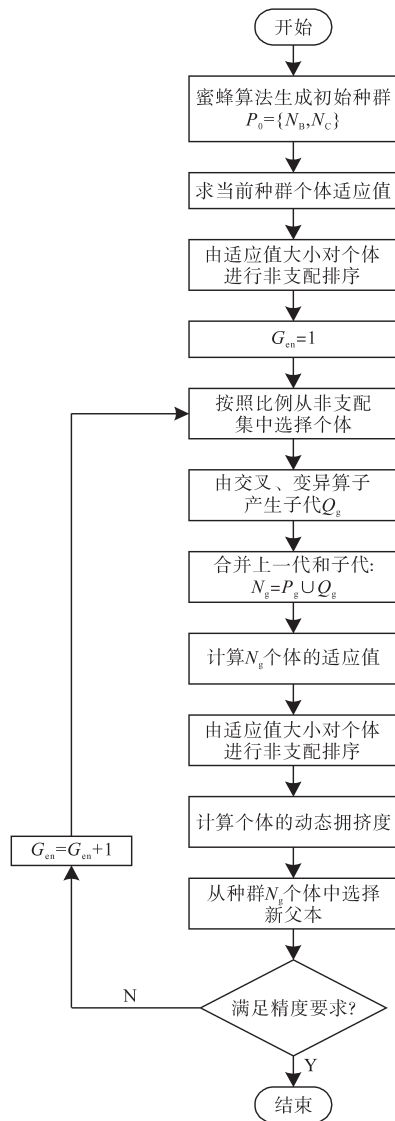


图3 配置优化算法流程

Fig.3 Flow chart of optimal sizing algorithm

蜜蜂算法由一个初始化过程和一个主搜索周期组成,该迭代过程将重复给定的次数,或者直到找到合适的适应度为止。每个搜索周期由5个过程组成:招募、局部搜索、区域缩小、放弃蜜源和全局搜索。该算法常用于产生初始种群,作为结合全局搜索的邻域搜索执行。具体步骤如下:

- 1) 随机产生初始群体;
- 2) 计算个体的适应度;
- 3) 为局部搜索选择蜜源地;
- 4) 为已选定的蜜源地招募采集蜂,并评估每个蜜源地的优劣;
- 5) 每片蜜源地选出适应度最高的采集蜂;

6) 除适应度最高的采集蜂外,剩下的蜜蜂随机搜索蜜源地并评价其优劣;

7) 满足精度要求后结束。

与粒子群算法、蚁群算法和遗传算法等相比,由于蜜蜂算法特有的整体觅食蜂招募和蜜源局部检索机制使蜜蜂算法同时具备较强的局部、全局寻优能力,且具有较快的收敛速度,常与其他算法混合以改进算法性能^[16]。文献[17-18]证明了蜜蜂算法相较于粒子群算法和其他一些进化算法在测试函数上准确率较高、鲁棒性较强,能得到适应度更高的初始群体,而与之同时运行的其他算法在问题复杂度提升后出现了收敛速度慢、易早熟的问题;实际的测试结果表明,蜜蜂算法能更快地产生接近全局最优的初始群体,利于提高后续算法的运算速度和帕累托解准确率。

3.2 动态拥挤度的NSGA-II算法

3.2.1 动态拥挤度

传统NSGA-II算法使用拥挤度 CD_i 来进行个体选择,个体拥挤度计算公式如下:

$$CD_i = \frac{1}{r} \sum_{k=1}^r |f_{i+1}^k - f_{i-1}^k| \quad (23)$$

式中: r 为目标函数的个数; f_i^k 为第 i 个个体对应第 k 个目标函数的值。

在空间中拥挤度表征了相邻个体围成的超立方体平均边长,其值越大表示其多样性越好。但传统拥挤度计算容易导致某一边很短但其他边较长的多样性较好的个体被舍弃。为了更好地提高非支配解集的多样性,提出改进的动态拥挤度。给出个体拥挤度方差:

$$V_i = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r (|f_{i+1}^k - f_{i-1}^k| - CD_i)^2 \quad (24)$$

动态拥挤度 DCD_i 定义如下:

$$DCD_i = \frac{CD_i}{\log(1/V_i)} \quad (25)$$

由定义可知,动态拥挤度能够权衡各个目标函数差异程度,选择出多样性更好的个体。

3.2.2 混合NSGA-II算法计算流程

1) 通过蜜蜂算法,结合优化问题的约束条件生成个体数为 $2N$ 的初始种群 P_0 ;

2) 从初始种群 P_0 中根据非支配排序数和动态拥挤度 DCD_i 选取个体数为 N 的种群 P_g ;

3) 从种群 P_g 中通过交叉、变异算子产生子代 Q_g ,个体数为 N ;

4) 合并亲本 P_g 和子代 Q_g ,形成配对池 N_g ,并

从中由非支配排序数和动态拥挤度 DCD_i 排序选出个体数为 N 的种群作为亲本;

5)重复以上过程,直到种群精度满足要求,得到符合要求的帕累托前沿。

4 实例验证

4.1 基站环境数据

四川某通讯基站示范工程取8 760 h辐照度、风速和基站负荷实测数据,如图4~图6所示。

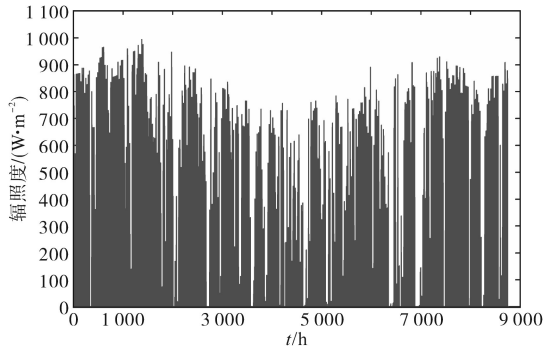


图4 太阳辐照度年度分布图

Fig.4 Diagram of annual distribution map of solar irradiance

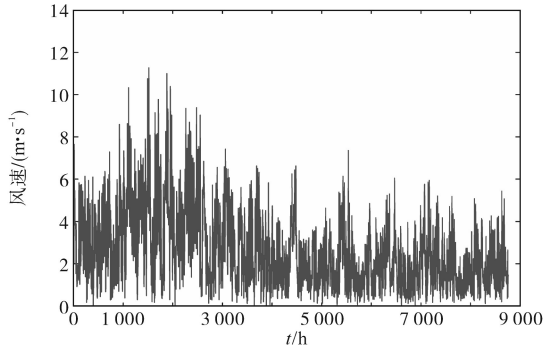


图5 风速年度分布图

Fig.5 Diagram of annual distribution map of wind speed

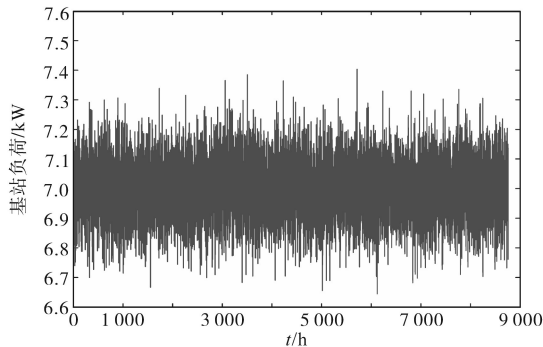


图6 基站负荷年度分布图

Fig.6 Diagram of annual distribution of base station load

4.2 元件参数

项目中基站供电系统寿命为15 a,因此蓄电池更换3次。通讯基站供电系统元件部分详细参数如表1所示。柴油发电机污染物排放系数如表2所示,给定年污染物排放量不超过9 720 kg。

表1 供电系统主要元件参数

Tab.1 Main component parameters of power supply system

元件类型	单价/元	年维护成本/元	替换成本/元	使用寿命/a
风力发电机	2 800	30	-	15
光伏板	650	7	-	15
柴油发电机	3 000	50	-	15
蓄电池	1 000	-	1 000	5

表2 柴油发电机污染物排放系数

Tab.2 Diesel generator pollutant emission coefficient

污染物类型	CO ₂	SO ₂	NO _x
排放系数/[g·(kW·h) ⁻¹]	649	0.206	9.890

4.3 容量配置优化结果分析

为了体现混合NSGA-II算法的优势,将其与传统的NSGA-II算法结果作比较。混合NSGA-II算法对基站供电系统容量配置优化结果与传统NSGA-II算法优化结果如图7所示。

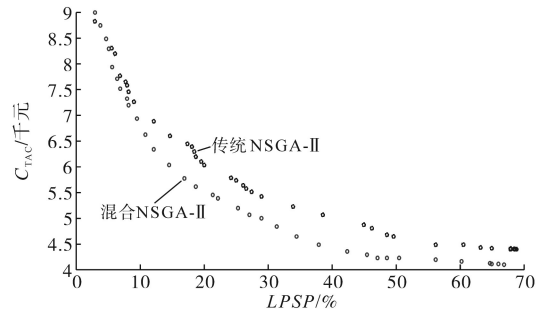


图7 传统和混合NSGA-II算法的帕累托前沿

Fig.7 Pareto front of traditional and hybrid NSGA-II

满足约束条件的情况下,取负荷缺电率 $LPSP$ 为5%,得到两种方法容量配置优化结果如表3所示。可见,混合NSGA-II算法得出的非支配解集更接近真实帕累托解,供电系统在相同稳定性参数 $LPSP$ 下,混合NSGA-II算法得到的配置优化解等价年金总成本 C_{TAC} 更低,相较传统算法具有更好的经济性,得到的帕累托前沿更接近真实非支配解集。

表3 容量配置优化结果

Tab.3 Results of optimal sizing

算法	风机/kW	光伏板/kW	蓄电池/(kW·h)	柴油机/kW	C_{TAC} /元
混合NSGA-II	8.4	7.8	8.4	6	7 822
传统NSGA-II	11.2	9.1	9	8	8 607

使用不均匀度指标评价算法所得帕累托前沿的多样性,定义如下:

$$\Delta = \frac{d_t + d_1 + \sum_{i=1}^{N-1} |d_i - \bar{d}|}{d_t + d_1 + (N-1)\bar{d}} \quad (26)$$

式中: d_t, d_1 分别为帕累托解集极端解与相邻解的

欧氏距离; d_i 为第*i*位个体的拥挤度; \bar{d} 为所有个体拥挤度的平均值; N 为帕累托解个体数。

不均匀度 Δ 值越小,帕累托前沿多样性越好。两种算法的收敛性和不均匀度如表4所示,可以看出,相较于传统NSGA-II算法,混合NSGA-II算法收敛速度显著提升,求解得到的帕累托前沿多样性更好、具有较好的均匀度。

表4 算法的迭代次数和解的不均匀度

算法	迭代次数	不均匀度
混合NSGA-II	140	0.54
传统NSGA-II	231	1.08

4.4 优化方法对柴油机和蓄电池出力影响

在满足约束条件的情况下,取相同的系统成本,分别得到传统NSGA-II算法和混合NSGA-II算法对应的容量配置优化组合。取2021年1月1日至2021年1月14日两星期基站气象数据,采样周期为1h,共计336h,比较两种优化算法对应的蓄电池和柴油发电机出力,如图8、图9所示。

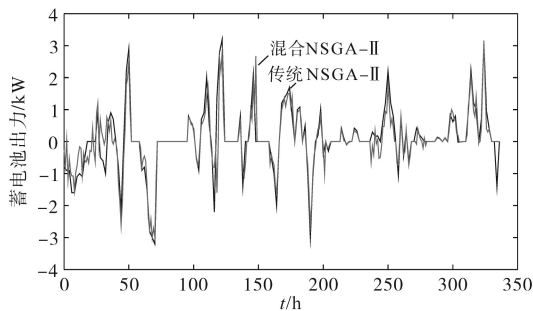


图8 两种算法对应的蓄电池出力

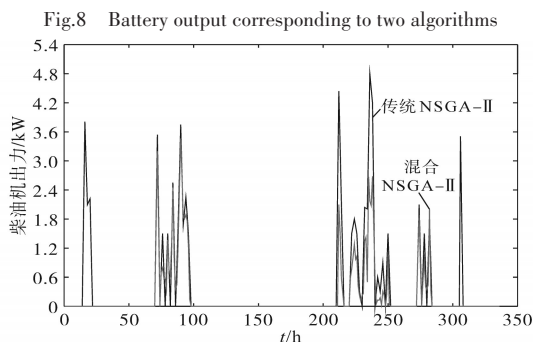


图9 两种算法对应的柴油发电机出力

Fig.9 Output of diesel generator corresponding to two algorithms

由图8、图9可以看出,混合NSGA-II算法所得配置优化组合蓄电池总体而言充放电功率下降,且混合NSGA-II算法较与传统算法使得柴油发电机启停次数明显减少,说明风光能源供电率提高。因此,在同样的成本条件下,混合NSGA-II算法能够得到使供电系统新能源自给率更高的系统,提高了辅助供电系统的稳定性。

5 结论

对四川某通讯基站风光互补供电系统,首先提出了系统功率分配策略。针对传统NSGA-II算法不足提出了一种利用蜜蜂算法产生初始群体并利用动态拥挤度进行个体多样性排序的混合NSGA-II算法。通讯基站实例优化结果表明,提出的算法相较于传统算法有更好的收敛性,得到的帕累托前沿具有更好的多样性;供电系统相同稳定性下能得到更低成本的配置优化组合,具有更好的经济性;在相同的成本下,系统配置优化组合对应的供电系统新能源自给率更高、稳定性更好。

参考文献

- [1] 于东霞,张建华,王晓燕,等. 并网型风光储互补发电系统容量优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(10): 59-65.
Yu Dongxia, Zhang Jianhua, Wang Xiaoyan, *et al.* Optimal capacity configuration of grid-connected wind-PV-storage hybrid power generation system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(10): 59-65.
- [2] Ramli M A M, Bouchevara H R E H, Alghamdi A S. Optimal sizing of PV/wind/diesel hybrid microgrid system using multi-objective self-adaptive differential evolution algorithm[J]. Renewable Energy, 2018, 121(6): 400-411.
- [3] Zolfaghari M, Ghaffarzadeh N, Ardakani A J. Optimal sizing of battery energy storage systems in off-grid micro grids using convex optimization[J]. The Journal of Energy Storage, 2019, 23(6): 44-56.
- [4] Xu X, Hu W, Cao D, *et al.* Optimized sizing of a standalone PV-wind-hydropower station with pumped-storage installation hybrid energy system[J]. Renewable Energy, 2020, 147(3): 1418-1431.
- [5] Hussein Mohammed Ridha, Chandima Gomes, Hashim Hizam, *et al.* Multi-objective optimization and multi-criteria decision-making methods for optimal design of standalone photovoltaic system: a comprehensive review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 135(1): 110202.
- [6] Deb K, Pratap A, Agarwal S, *et al.* A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [7] Shivam K, Tzou J C, Wu S C. Multi-objective sizing optimization of a grid-connected solar-wind hybrid system using climate classification: a case study of four locations in southern Taiwan [J]. Energies, 2020, 13(10): 2505.
- [8] Emad H M, Mohammadi C R. Optimal allocation of distributed generation with optimal sizing of fault current limiter to reduce the impact on distribution networks using NSGA-II[J]. IEEE

- Systems Journal, 2018, 13(2): 1714-1724.
- [9] Zhang C, Yang T. Optimal maintenance planning and resource allocation for wind farms based on non-dominated sorting genetic algorithm-II[J]. Renewable Energy, 2021, 164(2): 1540-1549.
- [10] 盛万兴,叶学顺,刘科研,等. 基于NSGA-II算法的分布式电源与微电网分组优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4655-4662.
- Sheng Wanxing, Ye Xueshun, Liu Keyan, *et al.* Optimal allocation between distributed generations and microgrid based on NSGA-II algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4655-4662.
- [11] 张大波,朱志鹏,连帅,等. 基于多场景变权多目标优化的UPFC在风电并网系统中的配置方案研究[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 638-645.
- Zhang Dabo, Zhu Zhipeng, Lian Shuai, *et al.* Allocation scheme research of UPFC based on multiple scenarios with different weighting coefficients and multi-target optimization in wind power integrated system[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 638-645.
- [12] 叶承晋,黄民翔,王焱,等. 基于离散概率模型的风光互补供电系统优化配置[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6): 48-54.
- Ye Chengjin, Huang Minxiang, Wang Yan, *et al.* A hybrid wind/photovoltaic power supply system based on discrete probabilistic methodology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 48-54.
- [13] 赵波,汪湘晋,张雪松,等. 考虑需求侧响应及不确定性的微电网双层优化配置方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(14): 3284-3295.
- Zhao Bo, Wang Xiangjin, Zhang Xuesong, *et al.* Two-layer method of microgrid optimal sizing considering demand-side response and uncertainties[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(14): 3284-3295.
- [14] Poles S, Fu Y, Rigoni E. Multiobjective programming and goal programming[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2009: 123-133.
- [15] Pham D T, Ghanbarzadeh A, Ko E, *et al.* The bees algorithm — a novel tool for complex optimisation problems[C]//2nd I*PROMS Virtual International Conference, 2006: 454-459.
- [16] Yuce B, Packianather M, Mastrocinque E, *et al.* Honey bees inspired optimization method: the bees algorithm[J]. Insects, 2013, 4(4): 646-662.
- [17] Pham D T, Castellani M, Le-Thi H A. Nature-inspired intelligent optimisation using the bees algorithm[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2014, 8342: 38-69.
- [18] Lale Özbakir, Adil Baykasoğlu, Pınar Tapkan. Bees algorithm for generalized assignment problem[J]. Applied Mathematics & Computation, 2010, 215(11): 3782-3795.

收稿日期:2021-01-16

修改稿日期:2021-03-10