

基于 SMCS-NSGA II 的独立型微网优化配置

赵文会¹, 余金龙², 李士动³

(1. 上海电力学院经济与管理学院, 上海 200090; 2. 国网安徽省电力公司黄山供电公司, 安徽 黄山 245000;
3. 国网山东省电力公司泰安供电公司, 山东 泰安 271000)

摘要: 针对独立型微网优化配置问题, 采用风速、光照强度及负荷的概率模型和序贯蒙特卡罗模拟法处理风光出力及负荷的不确定性。建立了以总净现费用为经济性优化目标和以年二氧化碳排放量为环保性优化目标的多目标优化配置模型。通过设置概率约束的方法处理相关不确定性下供电可靠性约束问题, 最后采用改进的非劣排序遗传算法对某算例进行仿真计算。讨论了供电可靠性置信水平和柴油价格增长对优化配置结果的影响, 结果表明所提优化配置模型和方法的有效性。

关键词: 独立型微网; 多目标; 优化配置; 不确定性; 序贯蒙特卡罗模拟

Optimal configuration of standalone microgrid based on SMCS-NSGA II algorithm

ZHAO Wenhui¹, YU Jinlong², LI Shidong³

(1. School of Economics and Management, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. Huangshan Power Supply Company, State Grid Anhui Electric Power Company, Huangshan 245000, China;
3. Taian Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Taian 271000, China)

Abstract: Aimed at the optimal configuration problem of standalone microgrid, the uncertainties of wind power, photovoltaic (PV) power, and load are modeled using their probability model and sequential Monte Carlo simulation. A multi-objective optimal model considering the net present cost in the full life cycle and the carbon dioxide emissions in every year is proposed. In this model, the probability constrained concerning the reliability is appended, and the non-dominated sorting genetic algorithm-II is used to solve the multi-objective model. Examples analyze the effects of different confidence level of reliability and diesel price on the optimal results, which prove the validity of proposed model and algorithm.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 71403163).

Key words: standalone microgrid; multi-objective; optimal configuration; uncertainty; sequential Monte Carlo simulation

中图分类号: TM71

文章编号: 1674-3415(2016)01-0097-09

0 引言

中国幅员辽阔, 境内存在大量海岛等偏远地区, 与大电网互联困难或者代价过大, 长期用电紧张, 而这些地区风、光等可再生资源往往较为丰富, 近些年风力机(WT)、光伏电池(PV)等分布式发电技术的不断发展为解决这些地区用电困难问题提供了新的思路。相对于单一风力发电系统或光伏发电系统,

包含风力机、光伏电池以及储能等设备的独立型微网系统无论是供电可靠性还是经济性等方面都存在较大的优势^[1-2]。

由于独立型微网中往往包含多种分布式电源和储能装置, 且负荷完全依靠系统内电源供电, 这就对独立型微网系统的优化配置技术提出较高要求。针对上述问题, 目前国内外学者多通过建立风力机、光伏电池等分布式电源的准稳态出力模型^[3-6]、各分布式电源和系统运行约束等模型^[7], 利用微网所在地的风速、光照强度和负荷等历史时序数据对系统进行时序仿真计算得到系统全寿命周期内优化目标值等信息; 其中, 优化目标主要分为两种形式, 第

基金项目: 国家自然科学基金项目(71403163); 教育部人文社会科学研究一般项目(11YJC790295); 上海市教委科研创新重点项目(13ZS121); 上海市哲学社科规划基金项目(2014BJB017)

一种是将环保性、可靠性指标通过经济折算归一化为经济性指标的单一经济性优化目标形式^[8-9],最后求得一个综合最优解;第二种是将经济性、环保性和可靠性等作为优化目标的多优化目标形式^[10-12],最后求得一组帕累托(Pareto)最优解集,其中经济性目标主要包括等年值费用^[10]、总净现费用^[11]等形式,环保性目标包括污染气体排放量^[11-12]等形式,可靠性目标则主要通过负荷缺电率^[6]、平均停电持续时间^[13]、系统平均停电频率^[14]等指标表征;模型的求解则多采用遗传算法^[15]、进化算法^[16]、粒子群^[17]算法等智能算法。

上述文献介绍的优化配置方法还存在一些局限:风速、光照强度等变量具有明显的随机性和间歇性,负荷也存在较大不确定性,这些不确定性会对已有的优化配置方法计算得到的系统配置在风速、光照和负荷发生一定程度波动的实际运行状态下的合理性、可靠性等方面提出了考验。文献[18]在独立型光储供电系统优化配置中采用蒙特卡罗模拟法处理了光照强度的不确定性;文献[19]在独立型风光储系统优化配置中利用序贯蒙特卡罗模拟法处理风光和负荷的不确定性,但仅将风力机、光伏电池容量作为优化变量,采用模式搜索法进行求解,该算法虽然可以减少计算量,但全局寻优能力较差,对优化变量初值要求很高,而独立型微网优化配置往往难以确定合适的初值。

本文以独立型风光柴储微网为例研究其优化配置问题。首先,建立风速、光照强度和负荷的概率模型,并介绍处理其不确定性的序贯蒙特卡罗模拟(Sequential Monte Carlo simulation, SMCS)方法;然后以经济性和环保性为优化目标,对系统供电可靠性设置概率约束,建立了独立型风光柴储微网多目标优化配置模型,并采用改进的非劣排序遗传算法(Nondominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)对模型进行求解;最后针对某独立型风光柴储微网算例进行仿真计算,验证了本文所提优化配置模型和方法的有效性。

1 风光出力 and 负荷不确定性的处理方法

1.1 WT 输出的概率模型

WT 输出的概率模型主要由风速的概率模型和基于风速的 WT 输出模型两部分构成,本文采用双参数的威布尔(Weibull)分布^[20]函数描述风速的分布特性,即

$$f(v) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

式中: $f(v)$ 为风速的概率密度函数; v 为风速; k 为 Weibull 分布的形状参数; c 为 Weibull 分布的尺度参数。

基于风速的 WT 输出模型详见文献[3-5]。

1.2 PV 输出的概率模型

PV 输出的概率模型主要由光照强度的概率模型和基于光照强度的 PV 输出模型两部分构成,本文采用贝塔(Beta)分布^[21]描述光照强度的分布特性,即

$$f(G) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \cdot \left(\frac{G}{G_{\max}}\right)^{\alpha-1} \cdot \left(1 - \frac{G}{G_{\max}}\right)^{\beta-1} \quad (2)$$

式中: $f(G)$ 为光照强度的概率密度函数; G 和 G_{\max} 分别为一段时间内的实际光照强度和最大光照强度(kW/m^2); α 和 β 为 Beta 分布的形状参数。

基于光照强度的 PV 输出模型详见文献[3-5]。

1.3 负荷的概率模型

相关研究表明,负荷的随机性近似服从正态分布^[18],则可得负荷的概率密度函数为

$$f(P_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_L} \exp\left[-\frac{(P - \mu_L)^2}{2\sigma_L^2}\right] \quad (3)$$

式中, μ_L 和 σ_L 分别表示负荷的平均值和标准差。

由于风速、光照强度和负荷在不同季节的不同时间存在较大差异,故本文将对一年中每个月份一天各个时刻的风速、光照强度和负荷进行概率建模,然后通过对这些概率模型的随机抽样得到全年时序样本数据。

蓄电池储能系统的输出模型详见文献[4-5],柴油发电机(柴发)的输出模型详见文献[22]。

1.4 序贯蒙特卡罗模拟法

蒙特卡罗模拟法(MCS)是一种基于概率统计理论的仿真算法,能够有效处理系统不确定性因素的影响,尤其适用于处理不确定性因素较多、较复杂的情况(如时序性、负荷波动、天气因素等)^[23]。风速、光照强度和负荷具有明显的时序性,因此独立型微网的优化配置往往需要进行时序仿真,本文采用能够有效计及上述不确定性变量时间上连续性的序贯蒙特卡罗模拟(SMCS)法,该方法主要是通过对上述风速、光照强度和负荷的概率模型进行随机抽样,获得若干个全年随机场景,然后将这些全年随机场景下仿真运行得出的优化目标的期望值作为不确定性场景下对应方案的评价指标。

2 独立型微网多目标优化配置模型

2.1 优化变量模型

选择微网系统中 WT 台数 N_{WT} 、PV 板数量 N_{PV} 、

蓄电池个数 N_{BAT} 和柴发台数 N_{DE} 作为优化变量, 即优化变量可定义为

$$X = [N_{\text{WT}} \ N_{\text{PV}} \ N_{\text{BAT}} \ N_{\text{DE}}] \quad (4)$$

2.2 优化目标模型

分别选择经济性和环保性作为优化目标, 即优化目标为

$$\min F(X) = \min \{f_1(X), f_2(X)\} \quad (5)$$

式中, $f_1(X)$ 和 $f_2(X)$ 分别表示经济性优化目标和环保性优化目标。

2.2.1 经济性目标模型

选择微网工程全寿命周期内总净现成本(NPC)作为经济性优化目标, 即

$$f_1(X) = NPC \quad (6)$$

式中, NPC 包括工程全寿命周期内的所有成本和收入, 可利用贴现率将未来的现金流换算到现值, 其数学表达式如式(7)所示。

$$NPC = C_1 + C_R + C_M + C_F - B_{\text{sa}} \quad (7)$$

式中: B_{sa} 表示工程寿命结束后设备残值的现值; C_1 、 C_R 、 C_M 、 C_F 分别表示系统的初始投资成本、置换费用、运行维护费用和燃料费用的现值, NPC 相关组成部分的计算公式^[24]如下。

(1) C_1 的计算公式

$$C_1 = \sum_{i=1}^{N_p} N_i C_i \quad (8)$$

式中: N_p 表示电源种类数; N_i 表示第 i 种电源的数量; C_i 表示第 i 种电源的单价。

(2) C_R 的计算公式

$$C_R = \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_{R_i}} N_i C_i \left(\frac{1+R_{C_i}}{1+r} \right)^{j \times L_i} \quad (9)$$

式中: r 为贴现率; R_{C_i} 表示第 i 种电源价格的年变化率; L_i 表示第 i 种电源的寿命; N_{R_i} 表示第 i 种电源置换次数, 其计算公式如式(10)。

$$N_{R_i} = \begin{cases} K/L_i - 1 & \text{if } K\%L_i = 0 \\ \lceil K/L_i \rceil & \text{if } K\%L_i \neq 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: K 表示工程的使用年限; $\%$ 表示求余符号; $\lceil \rceil$ 表示向下取整符号。

(3) C_M 的计算公式

$$C_M = \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=1}^K N_i C_{M_i} \left(\frac{1+R_{M_i}}{1+r} \right)^j \quad (11)$$

式中: C_{M_i} 表示第 i 种电源单台年运行维护费用; R_{M_i} 表示第 i 种电源运行维护费用的年变化率。

(4) C_F 的计算公式

$$C_F = \sum_{j=1}^K Q_{\text{fu}} C_f \left(\frac{1+R_f}{1+r} \right)^j \quad (12)$$

式中: Q_{fu} 为系统年柴油消耗量; C_f 表示柴油价格; R_f 表示柴油价格的年变化率。

2.2.2 环保性目标模型

近些年国内包括雾霾天气等在内的各种环境污染事件频发, 未来微网工程的建设必将越来越重视环保问题, 目前考虑的排放气体多指 CO_2 , 因此本文选择系统年 CO_2 排放量 E_{CO_2} 作为环保性优化目标, 即

$$f_2(X) = E_{\text{CO}_2} \quad (13)$$

在独立型风光柴储微网中, 会产生 CO_2 的电源只有柴发, 因此认为 E_{CO_2} 等于年柴油消耗量乘以柴发的 CO_2 排放系数, 即

$$E_{\text{CO}_2} = \alpha_{\text{CO}_2} Q_{\text{fu}} \quad (14)$$

式中, α_{CO_2} 为柴发的 CO_2 排放系数。

2.3 系统运行约束模型

2.3.1 供电可靠性概率约束

为了在仿真中合理评估风、光出力和负荷不确定性对系统供电可靠性的影响, 本文对系统供电可靠性设置如下概率约束。

$$P_r(f_{\text{LPSP}} > 0) \leq 1 - \alpha \quad (15)$$

式中: α 表示供电可靠性约束的置信水平; f_{LPSP} 表示系统年负荷缺电概率, 其表达式^[7]如式(16)。

$$f_{\text{LPSP}} = \sum_{t=1}^{8760} P_{\text{Loss}}(t) / \sum_{t=1}^{8760} P_L(t) \quad (16)$$

式中: $P_{\text{Loss}}(t)$ 为 t 时刻的负荷缺额; $P_L(t)$ 为 t 时刻负荷的大小。

2.3.2 电源相关约束

(1) 电源安装数量约束

$$N_{\text{imin}} \leq N_i \leq N_{\text{imax}} \quad (17)$$

式中, N_{imax} 和 N_{imin} 分别表示微网工程所允许的第 i 种电源的最大和最小安装数量。

(2) 电源出力约束

$$P_{\text{imin}} \leq P_i \leq P_{\text{imax}} \quad (18)$$

式中, P_{imax} 和 P_{imin} 分别表示第 i 种电源的最大和最小出力。风力机、光伏电池的最大出力约束主要由各时刻的风速、光照强度决定; 柴发允许的最小运行功率一般设为额定功率的 0.3 倍; 蓄电池储能系统(BESS)除了充放电功率需要满足上述约束外, 还需对其荷电状态(SOC)设定约束^[25], 即

$$SOC_{\text{min}} \leq SOC \leq SOC_{\text{max}} \quad (19)$$

式中, SOC_{max} 和 SOC_{min} 分别表示 BESS 允许的 SOC

上限和下限。

2.4 模型的求解

本文选择 NSGA-II 算法对独立型微网的多目标优化配置问题进行求解, 该算法有以下优点: (1) 通过对种群进行基于分级的快速非支配排序, 降低了算法的复杂性, 提高了计算速度; (2) 引入了精英策略, 在父代种群和子代种群的中选择产生下一

代种群, 有利于保留父代种群中的优良个体, 提高了种群的整体进化水平; (3) 通过定义拥挤度概念, 保证了种群在寻优过程中的多样性^[26-27]。该优化算法已在一些多目标优化问题中得到有效应用, 其求解流程如图 1 所示。

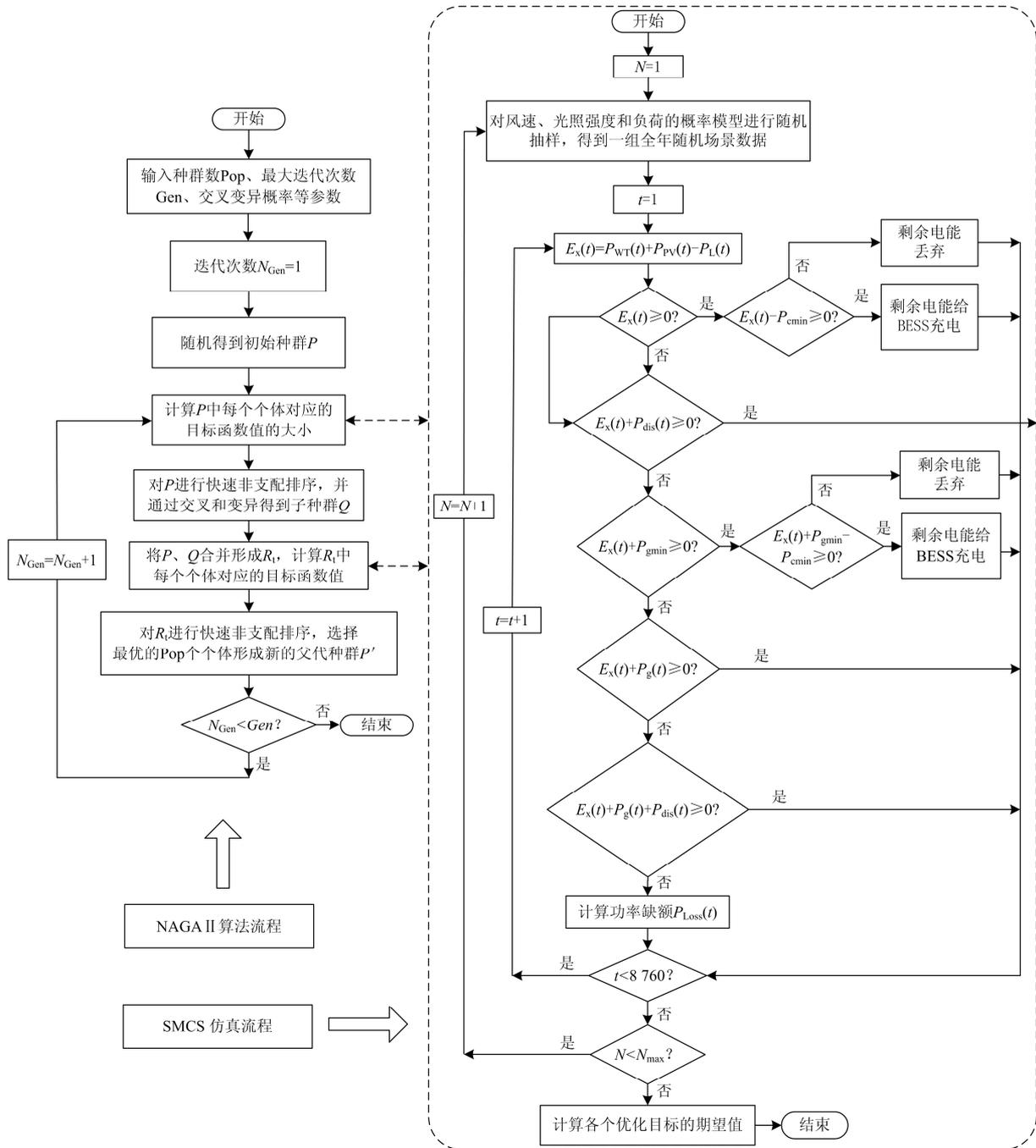


图 1 基于 SMCS-NSGA II 算法的优化配置步骤

Fig. 1 Flowchart of optimal configuration based on SMCS-NSGA II algorithm

风力机、光伏电池的出力具有较大的间歇性和随机性, BESS 主要用于平抑风光出力的波动, 柴发则主要充当补充电源和备用电源的角色。为合理协调时序仿真时各仿真时段系统内各电源的出力满足负荷需求, 往往需要设计一套合理的运行策略, 本文的仿真求解步骤和采用的运行策略如图 1 所示。图中: $P_{WT}(t)$ 、 $P_{PV}(t)$ 分别表示 t 时刻风力发电系统和光伏发电系统的最大出力; $P_L(t)$ 表示 t 时刻负荷的大小; P_{cmin} 和 P_{gmin} 分别表示 BESS 允许的最小充电功率和柴油发电机允许的最小运行功率; $P_g(t)$ 和 $P_{dis}(t)$ 分别表示 t 时刻柴油发电机的出力和 BESS 放电功率的大小; N_{max} 表示 SMCS 的最大仿真年限数。

运行策略具体介绍如下: (1) 当风光出力过剩时, 负荷优先由风光出力满足, 若有功率过剩且过剩功率大于 BESS 允许的最小充电功率 P_{cmin} 时, 则给 BESS 充电, 反之不充电, 盈余功率通过可控负载消耗或者直接丢弃; (2) 当风光出力不足时, 负荷优先由风光储出力来满足, 柴油发电机不工作; (3) 若风光储出力无法满足负荷需要, 则 BESS 不放电, 此时负荷优先由风光柴出力满足; (4) 若风光柴工作在允许的最大功率下仍不能完全满足负荷需要, 再开启 BESS 放电; (5) 若所有电源同时工作仍不能满足负荷需要, 则出现供电不足的情况, 此时需切除部分非重要负荷。

3 仿真算例与结果分析

3.1 仿真算例

为验证本文提出的优化配置模型和方法的有效性, 下面对某独立型风光柴储微网算例进行仿真计算。图 2 的(a)、(b)、(c)分别所示的是本算例中一月份每天各个时刻风速、光照强度和负荷概率密度函数的相关参数。

本算例待选电源的相关参数和安装数量限制如表 1 所示。选用的蓄电池为免维护铅酸蓄电池, 使用期间运行维护费用为 0^[8], WT 和 PV 的运行维护费用主要与其额定容量有关, 而柴油发电机运行维护费用与额定容量、实际运行功率有关。假设 WT 和 PV 的寿命为 20 年, 而柴油发电机的寿命由其实际运行时间决定, 铅酸蓄电池的实际使用寿命则根据蓄电池寿命曲线, 通过计算蓄电池等效充放电循环次数来计算^[28]。工程寿命周期 K 取 20 年, 贴现率 r 取 6%, 柴油价格 C_f 设定为 7.36 元/L, 上述数据和参数来自文献[8,28]。

NSGA-II 算法的参数设置如下: 种群数取 100, 最大迭代次数取 100, 交叉率和变异率分别设定为 0.9 和 0.1。

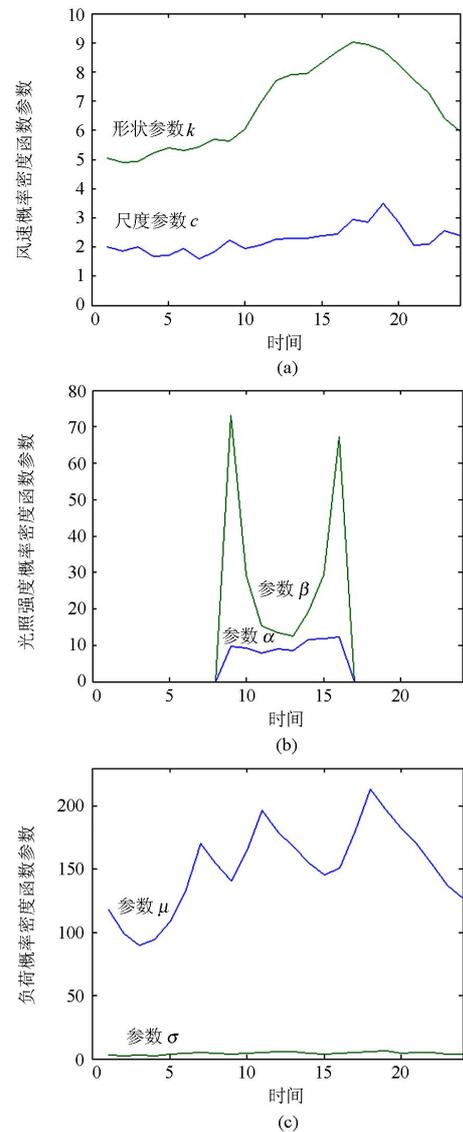


图 2 一月份每天各个时刻风速、光照强度和负荷概率密度函数的参数

Fig. 2 Parameters of the probability density function of the wind, light and load various times daily in January

表 1 待选电源型号及相关参数

Table 1 Parameters of each unit

电源类型	额定容量	允许下限/上限	初始投资费用	运行维护费用	寿命
WT	30 kW	0/50	600 000 元/台	1 200 元/(台·年)	20 年
PV	0.18 kW	0/6 000	2 000 元/块	230 元/(kW·年)	20 年
柴油发电机	100 kW	0/3	55 000 元/台	1 200 元/(台·年)+0.094 6 元/kW	20 000 h
铅酸蓄电池	1 000 A·h	0/3 000	1 800 元/个	0	—

3.2 SMCS 收敛次数判定

对于 SMCS 而言, 在一定的计算精度要求下, 所需样本容量是一个随机变量; 而在给定样本容量的情况下, 计算精度也是一个随机变量^[29]。对于独立型微网优化配置问题而言, 当样本容量数, 即最大仿真年限数 N_{max} 趋于无穷大时样本均值将逼近其期望值, 即其计算误差趋于零。在优化仿真求解过程中, 对每一个个体至少要进行 N_{max} 次全年时序仿真, N_{max} 过大时计算成本太高, N_{max} 太小则计算精度不够。因此, 必须对计算成本和计算精度进行权衡, 选择合适的最大仿真年限数。

表 2 三种典型配置详情

Table 2 Details of the three typical configurations

	典型配置 1	典型配置 2	典型配置 3
WT 数量	20	20	10
PV 数量	2 800	1 900	2 800
柴发数量	2	2	2
铅酸蓄电池数量	400	1 000	1 000

表 2 为三种较为典型的系统配置, 下面采用 SMCS 对这些配置在抽样得到的全年随机场景下进行全年时序仿真, 得到的结果如图 3 所示。从图中可以看出, 仿真年限数达到一定程度后两个优化目标的期望值接近收敛。因此, 综合考虑计算量和计算精度, 本文设定 N_{max} 为 200。

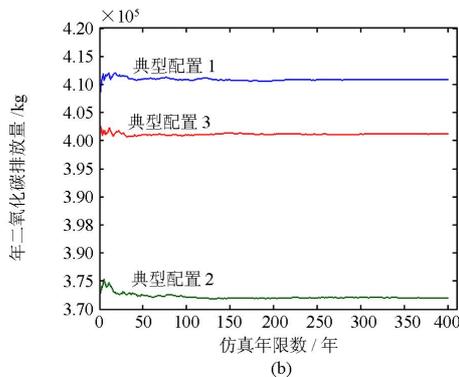
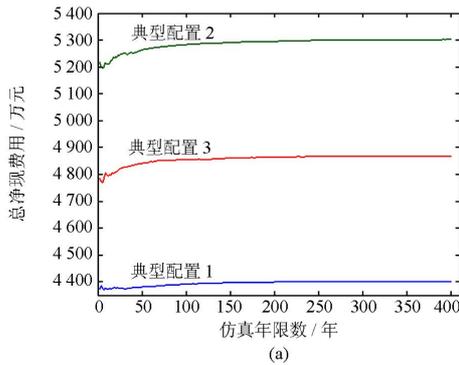


图 3 三种典型配置仿真结果

Fig. 3 Simulation results of the three typical configurations

3.3 仿真结果分析

3.3.1 不同置信水平下优化配置结果分析

将系统供电可靠性的置信水平 α 分别设定为 0.8、0.9、1.0, 仿真计算得到的结果如图 4 所示。三种置信水平下优化目标以及年负荷缺电概率的极值如表 3 所示。

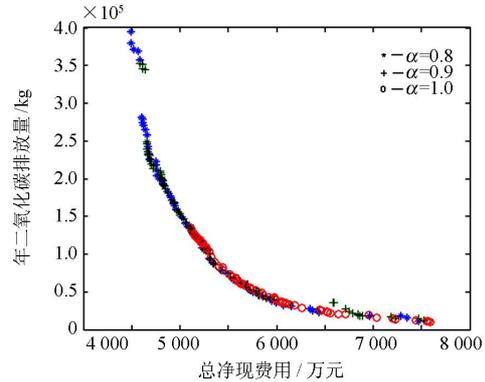


图 4 不同供电可靠性置信水平下的仿真结果

Fig. 4 Simulation results in different confidence level of reliability

表 3 优化目标及年负荷缺电概率的极值(极小值/极大值)

Table 3 The extreme value of the optimization objectives and f_{LPSP}

	NPC /万元	E_{CO_2} /kg	$f_{LPSP}/\%$
$\alpha=0.8$	4 489.69/7 471.55	11 057.35/394 766.26	0/0.002 05
$\alpha=0.9$	4 583.91/7 521.61	12 468.05/353 178.55	0/0.000 9
$\alpha=1.0$	5 106.15/7 585.58	10 488.69/135 022.66	0/0

首先从图 4 可以看出, 三种不同置信水平下, NPC 和 E_{CO_2} 两个优化目标都呈现相互排斥的态势, 但是随着 NPC 的上升, E_{CO_2} 下降的趋势逐渐放缓: 当 NPC 低于 5 500 万元时, E_{CO_2} 以较快的趋势下降; 而当 NPC 超过 6 500 万元后, E_{CO_2} 几乎不再下降。可以看出, 在当前的经济和技术水平下, 独立型风光柴储微网中可再生能源出力比例的提高需要以经济成本的上升为代价, 且随着经济成本的增加, 减少单位 CO_2 排放所付出的经济成本逐渐增多。

再来分析不同供电可靠性置信水平对优化配置结果的影响: 置信水平 α 的上升意味着对系统配置在各种随机场景下供电可靠性要求的提高, 从表 3 中 f_{LPSP} 的变化区间也能看出, 置信水平 α 越高, 优化得出的配置供电可靠性越高; 但同时 NPC 的极小值也有较大幅度的上升, 例如, 当 α 为 0.8 时, NPC 最小的配置仅需 4 489.69 万元, 而 α 为 1.0 时(即要求系统配置在各种随机场景下 100% 满足负荷需要), 优化得出的 NPC 最低的配置需 5 106.15 万元。

这说明随着系统供电可靠性要求的提高, 所需付出最低经济成本也随之升高。

因此, 在实际微网优化配置中, 可根据实际允许的经济费用区间和供电可靠性要求来设定合理的置信水平进行优化配置计算, 保证经济性、供电可靠性等方面的平衡。

3.3.2 柴油价格敏感度分析

虽然可再生能源在全社会能源消耗中所占比重逐年增大, 但是未来较长一段时间内, 传统化石能源仍将占主导地位, 伴随着能源紧缺和需求增大, 再加上政府对节能减排、保护环境的逐步重视, 未来可能通过调整化石燃料税率、提高燃料品质、征收温室气体和污染气体排放惩罚等形式推高柴油等化石燃料的价格, 但价格上涨幅度难以预计, 因此下文对柴油价格上涨对系统配置的影响进行敏感度分析: 将柴油价格 C_f 分别设定为现价的 1.5 倍、2 倍, 即 $C_f=11.04$ 、 14.72 元/L 进行优化配置计算, 得到的优化配置结果如图 5 所示。

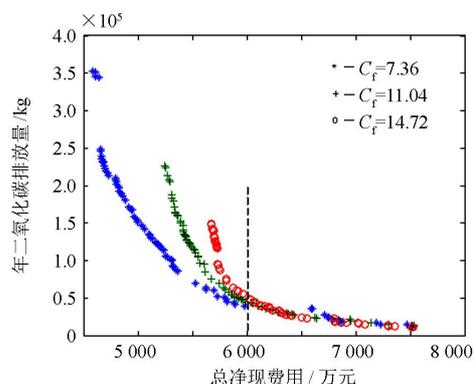


图 5 不同柴油价格下的仿真结果

Fig. 5 Simulation results in different diesel price

从图 5 中可以看出, 在几种不同的柴油价格水平下, NPC 和 E_{CO_2} 两个优化目标依旧保持此消彼长的态势, 但是随着柴油价格不断上涨, 优化得到的最优解集的 NPC 极小值也随之增大, 优化目标值的变化区间减小, 也就是说优化得到的方案数变少。此外还可以看出, NPC 在约 6 000 万元以下时, 柴油价格越高, 减少单位 CO_2 排放所付出的经济成本越少; 当 NPC 在约 6 000 万元以上时, 不同柴油价格下优化得出的配置的 E_{CO_2} 接近相同, 也就是说 NPC 在约 6 000 万元以上的配置对柴油价格上涨的鲁棒性较强。

4 结论

本文针对风光出力和负荷的不确定性, 建立了基于 SMCS-NSGA II 的独立型微网多目标优化配置

模型, 采用设置概率约束的方法处理相关不确定性下的供电可靠性约束问题。最后, 针对某算例进行仿真计算, 分析讨论了不同供电可靠性置信水平和柴油价格对优化配置结果的影响, 结果表明:

(1) 不同供电可靠性置信水平和柴油价格下, 总净现费用和年 CO_2 排放量两个优化目标均呈现相互排斥的态势;

(2) 不同供电可靠性置信水平和柴油价格会对优化配置结果产生较大影响, 实际微网优化配置时应从实际情况出发, 合理处理风光出力、负荷以及柴油价格等不确定性因素对优化配置的影响。

参考文献

- [1] KASHEFI KAVIANI A, RIAHY G H, KOUHSARI S H. Optimal design of a reliable hydrogen-based stand-alone wind/PV generating system considering component outages[J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(11): 2380-2390.
- [2] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(2): 1-12.
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(2): 1-12.
- [3] 韩璐, 李凤婷, 周二雄, 等. 基于成本-收益的微网分布式能源优化配置[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(14): 387-396.
HAN Lu, LI Fengting, ZHOU Erxiong, et al. The distributed energy optimization configuration of micro-grid based on cost-benefit[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(14): 387-396.
- [4] DESHMUKH M K, DESHMUKH S S. Modeling of hybrid renewable energy systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12(1): 235-249.
- [5] YANG H, LU L, ZHOU W. A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system[J]. *Solar Energy*, 2007, 81(1): 76-84.
- [6] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(17): 77-81.
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. PSCAD/EMTDC-based three-phase photovoltaic grid power system simulation research[J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(17): 77-81.
- [7] 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 CSEE, 2012, 32(25): 88-98.
- [8] 刘梦璇, 王成山, 郭力, 等. 基于多目标的独立微电网优化设计方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 34-39.
- LIU Mengxuan, WANG Chengshan, GUO Li, et al. An optimal design method of multi-objective based island microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 34-39.
- [9] 丁明, 王波, 赵波, 等. 独立风光柴储微网系统容量优化配置[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 575-581.
- DING Ming, WANG Bo, ZHAO Bo, et al. Configuration optimization of capacity of standalone PV-wind-diesel-battery hybrid microgrid[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 575-581.
- [10] 陈健, 王成山, 赵波, 等. 考虑不同控制策略的独立型微电网优化配置[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 1-6.
- CHEN Jian, WANG Chengshan, ZHAO Bo, et al. Optimal sizing for stand-alone microgrid considering different control strategies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 1-6.
- [11] DUFO-LOPEZ R, BERNAL-AGUSTIN J L. Multi-objective design of PV-wind-diesel-hydrogen-battery systems[J]. Renewable Energy, 2008, 33(12): 2559-2572.
- [12] PERERA A T D, ATTALAGE R A, PERERA K, et al. Designing standalone hybrid energy systems minimizing initial investment, life cycle cost and pollutant emission[J]. Energy, 2013, 54: 220-230.
- [13] AREFIFAR S A, MOHAMED Y A R I, EL-FOULY T H M. Optimum microgrid design for enhancing reliability and supply-security[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(3): 1567-1575.
- [14] 王晶, 陈江斌, 束洪春. 基于可靠性的微网容量最优配置[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 120-127.
- WANG Jing, CHEN Jiangbin, SHU Hongchun. Microgrid capacity configuration optimization based on reliability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 120-127.
- [15] 宋晓英, 王艳松. 基于协同进化遗传算法的微网经济环保调度[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 85-89.
- SONG Xiaoying, WANG Yansong. Economic and environmental dispatch of microgrid using co-evolutionary genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 85-89.
- [16] 杨琦, 张建华, 刘自发, 等. 风光互补混合供电系统多目标优化设计[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 86-90.
- YANG Qi, ZHANG Jianhua, LIU Zifa, et al. Multi-objective optimization of hybrid PV/wind power supply system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 86-90.
- [17] KASHEFI KAVIANI A, RIAHY G H, KOUHSARI S H. Optimal design of a reliable hydrogen-based stand-alone wind/PV generating system, considering component outages[J]. Renewable Energy, 2009, 34(11): 2380-2390.
- [18] ARUN P, BANERJEE R, BANDYOPADHYAY S. Optimum sizing of photovoltaic battery systems incorporating uncertainty through design space approach[J]. Solar Energy, 2009, 83(7): 1013-1025.
- [19] ARABALI A, GHOFRANI M, ETEZADI-AMOLIM, et al. Stochastic performance assessment and sizing for a hybrid power system of solar/wind/energy storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(2): 363-371.
- [20] 张建华, 王昕伟, 蒋程, 等. 基于蒙特卡罗方法的风电场有功出力的概率性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 82-87.
- ZHANG Jianhua, WANG Xinwei, JIANG Cheng, et al. Probabilistic assessment of wind farm active power based on Monte-Carlo simulation [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 82-87.
- [21] 于青, 刘刚, 刘自发, 等. 基于量子微分进化算法的分布式电源多目标优化规划[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 66-72.
- YU Qing, LIU Gang, LIU Zifa, et al. Multi-objective optimal planning of distributed generation based on quantum differential evolution algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 66-72.
- [22] 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.
- [23] 李庚银, 高亚静, 周明. 可用输电能力评估的序贯蒙

- 特卡罗仿真法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 74-79.
- LI Gengyin, GAO Yajing, ZHOU Ming. Sequential Monte Carlo simulation approach for assessment of available transfer capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 74-79.
- [24] PALIWAL P, PATIDAR N P, NEMA R K. Determination of reliability constrained optimal resource mix for an autonomous hybrid power system using particle swarm optimization[J]. Renewable Energy, 2014, 63: 194-204.
- [25] 刘方, 杨秀, 时珊珊, 等. 基于序列运算的微网经济优化调度[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 227-237.
- LIU Fang, YANG Xiu, SHI Shanshan, et al. Economic operation of micro-grid based on sequence operation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 227-237.
- [26] 陈征, 肖湘宁, 路欣怡, 等. 含光伏发电系统的电动汽车充电站多目标容量优化配置方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 238-248.
- CHEN Zheng, XIAO Xiangning, LU Xinyi, et al. Multi-objective optimization for capacity configuration of PV-based electric vehicle charging stations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 238-248.
- [27] 赵媛媛, 艾芊, 余志文, 等. 考虑多种因素评估的微电网优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 23-30.
- ZHAO Yuanyuan, AI Qian, YU Zhiwen, et al. A microgrid optimal scheduling considering the assessment of various factors[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 23-30.
- [28] 陈健, 王成山, 赵波, 等. 考虑储能系统特性的独立微电网系统经济运行优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(20): 25-31.
- CHEN Jian, WANG Chengshan, ZHAO Bo, et al. Economic operation of a stand-alone microgrid system considering characteristics of energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(20): 25-31.
- [29] 赵渊, 周家启, 刘志宏. 大电网可靠性的序贯和非序贯蒙特卡洛仿真的收敛性分析及比较[J]. 电工技术学报, 2009, 24(11): 127-133.
- ZHAO Yuan, ZHOU Jiaqi, LIU Zhihong. Economic convergence analysis and comparison of sequential and nonsequential Monte-Carlo simulation for bulk power system reliability assessment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 127-133.

收稿日期: 2015-03-14; 修回日期: 2015-05-19

作者简介:

赵文会(1977-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为能源经济、系统分析与优化;

余金龙(1990-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为分布式电源和微网优化技术; Email: yujinlong90@126.com

李士动(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力市场理论、电力系统运行优化。

(编辑 姜新丽)