

基于可靠性的微网容量最优配置

王 晶¹, 陈江斌², 束洪春³

(1. 浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310014; 2. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804;

3. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650051)

摘要: 针对风/光/储独立供电微网, 提出一种基于可靠性的最优容量配置方法。首先, 考虑风速和光照强度的随机性, 分别建立风力发电机、光伏阵列以及蓄电池的数学模型; 在此基础上建立包含设备投资费用、运行维护费用、蓄电池重置费用以及系统可靠性和能量过剩率指标的优化配置模型, 并确定约束条件; 其次, 采用改进粒子群优化算法对微网容量优化问题进行求解。在 MATLAB 环境下编程实现微源最优配置方案, 结果表明优化后的微网不仅保证了系统供电可靠性, 而且节省了经济成本。

关键词: 微网; 优化; 容量配置; 可靠性; 粒子群优化算法

中图分类号: TM 731

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.04.021

0 引言

随着化石能源逐渐短缺和环境污染日益严重, 利用清洁能源的分布式电源 DG (Distributed Generation) 被提上了日程, 而微网能有效地整合各种 DG、储能单元及负荷, 是未来智能电网的重要组成部分^[1-3]。独立微网规划设计阶段中 DG 的定容和选址是首要解决的问题。一般主要从负荷和 DG 这 2 个角度考虑^[4]; 负荷方面要保证供电可靠性和电能质量; DG 方面考虑投资成本和电网稳定性等因素, 确定其最优容量和位置。对微网进行合理的优化配置可以有效地减少投资成本, 提高负荷点的供电可靠性, 保障电网的安全稳定运行, 有利于节能减排^[5-6], 故逐渐受到多国政府和学者们的重视。

目前, 国内外一些学者已对微网容量优化配置进行了相关研究, 并取得了一些理论成果。文献[7]考虑系统的可靠性指标, 并以部署和热补偿成本最低为优化目标, 利用模拟退火法进行求解, 确定了微源的最优安装位置和容量, 但对于每一节点配置微源的类型没有给出相应的结果; 文献[8]提出蚁群算法确定 DG 的最优位置和安装容量, 其在满足 DG 容量约束的条件下, 以系统网损最小为目标寻求最优解, 然而蚁群算法选择的参数多且不同参数对优化结果影响较大, 容易导致求得的并不是最优解; 文献[9]考虑风机和光伏的互补性, 以系统可靠性为约束, 建立了计及系统投资成本、运行维护成本等综合成本的经济模型, 采用改进微分算法对独立微网容量优化配置进行求解, 但没有考虑蓄电池充放电功率的约束, 这会影响系统的可靠性指标; 文献[10]考虑风机、光伏、燃气轮机等多种微源, 并以

经济成本、供电可靠性和环境效益作为优化目标, 将混沌优化技术和遗传算法相结合, 对独立运行微网系统容量进行优化配置, 但没有进一步讨论微源选址的问题; 文献[11]提出细菌觅食法对风/光/储混合微网电源进行优化配置, 在已知各微源模型的基础上建立计及设备投资、运行维护、环保折算和燃料成本的优化目标, 根据不同可靠性指标得到相应微源的最优配置方案, 但未考虑独立微网中可能存在能量浪费的现象, 缺乏对能量利用率的衡量。

本文针对风/光/储独立供电微网, 在分析各微源功率模型的基础上, 构建了微网的经济成本、供电可靠性、能量过剩率的优化目标函数, 提出一种基于可靠性的微源优化配置方法, 并将其应用于一个 5 节点孤岛系统中。算例分析表明, 该方法不仅实现了对独立微网中微源容量的优化配置, 而且确定了微源接入系统的最优位置, 在保证优化后孤岛供电可靠性的同时, 节省了经济成本。

1 风/光/储微网电源模型

本文建立的独立微网结构如图 1 所示, 主要包括微网控制系统、DG 和用电负荷三大部分。微网控制系统能统一管理其内部所有 DG 和负荷, DG 包含风机、光伏和蓄电池 3 种。

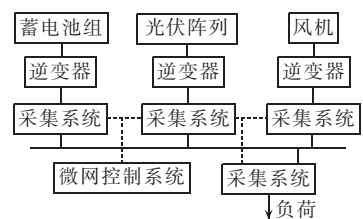


图 1 独立微网示意图

Fig.1 Schematic diagram of standalone microgrid

1.1 风力发电机模型

风机的输出功率随风速的变化而变化, 本文采

收稿日期: 2013-07-04; 修回日期: 2014-02-25

基金项目: 国家自然科学基金主任基金资助项目 (51147010); 国家自然科学基金青年基金资助项目 (51107120)

Project supported by China Natural Science Foundation Director Fund (51147010) and China Natural Science Foundation for Young Scholars (51107120)

用威布尔(Weibull)分布对风速进行处理,其概率密度函数如下^[12]:

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

其中, v 为风速; k 和 c 为 Weibull 模型中的形状和尺度参数。

由此可建立风机输出功率和风速之间的近似关系,表示如下:

$$P = \begin{cases} 0 & v < v_{in}, v > v_{out} \\ P_N \frac{v - v_{in}}{v_N - v_{in}} & v_{in} \leq v \leq v_N \\ P_N & v_N < v \leq v_{out} \end{cases} \quad (2)$$

其中, v_{in} 、 v_N 、 v_{out} 分别为切入风速、额定风速、切出风速; P_N 为额定输出功率。

1.2 光伏阵列模型

光伏阵列的输出功率随光照强度和环境温度的变化而变化,本文采用 Beta 分布对光照进行处理,其概率密度函数如下^[13]:

$$f\left(\frac{G}{G_{max}}\right) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{G}{G_{max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{G}{G_{max}}\right)^{\beta-1} \quad (3)$$

其中, Γ 为 Gamma 函数; α 、 β 为 Beta 分布的 2 个形状参数,不同时间段内根据光照强度平均值和标准差求得; G 、 G_{max} 分别为测试时间段内太阳光照的实际强度和最大强度(W/m^2)。

由此可建立光伏阵列输出功率模型如下^[11]:

$$P_{PV}(t) = P_{STC} \frac{G(t)}{G_{STC}} \left[1 + g \left(T_{air}(t) + 30 \times \frac{G(t)}{1000} - T_{STC} \right) \right] \quad (4)$$

其中, P_{STC} 为标准测试环境(STC)下的最大测试功率; G_{STC} 为标准条件下的光照强度,取 $1000 W/m^2$; $G(t)$ 为第 t 小时太阳光照的实际强度; g 为功率温度系数(通常取 $-0.0045/^\circ C$); T_{STC} 为参考温度(一般取 $25^\circ C$); $T_{air}(t)$ 为第 t 小时的环境温度。

1.3 蓄电池模型

a. 荷电状态 SOC(State Of Charge)。

蓄电池荷电状态是反映蓄电池剩余电量占其总容量比例的参数,定义为^[14]:

$$SOC = \frac{C_{net}}{C_{bat}} \quad (5)$$

其中, C_{bat} 为蓄电池总容量($A \cdot h$); C_{net} 为蓄电池剩余容量($A \cdot h$)。

考虑蓄电池的自放电和充放电,可得前后两时间段蓄电池荷电状态的关系,表示如下^[15]:

$$I_{bat}(t) = \frac{P_{bat}(t)}{N_{bat} U_{bat}(t)} \quad (6)$$

$$SOC(t+1) = SOC(t)(1 - \sigma(t)) + I_{bat}(t) \Delta t \eta(t) / C_{bat} \quad (7)$$

其中, $I_{bat}(t)$ 为第 t 小时充放电电流(大于 0 表示充电,小于 0 表示放电); $P_{bat}(t)$ 为第 t 小时充放电功率; $U_{bat}(t)$ 为蓄电池端电压; $\sigma(t)$ 为自放电率,每小

时取 0.01%; Δt 为步长; N_{bat} 为蓄电池的数量; $\eta(t)$ 为充放电效率,表示如下^[16]:

$$\eta(t) = \begin{cases} 1 - \exp \left[20.73(SOC(t) - 1) / \left(\frac{I_{bat}(t)}{0.1 C_{bat}} + 0.55 \right) \right] & I_{bat}(t) > 0 \\ 1 & I_{bat}(t) \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

显然,在一定的充电电流下,蓄电池的充电效率随着 SOC 的上升而下降,而放电效率则视为 1。

b. 端电压模型。

蓄电池端电压可由带内阻的电压源等效模型表示^[17]:

$$\begin{aligned} U_{bat}(t) &= E_{oc}(t) + I_{bat}(t) R_{bat}(t) \\ E_{oc}(t) &= V_F + b \log[SOC(t)] \\ R_{bat}(t) &= R_d(t) + R_1(t) \\ R_d(t) &= r_1 + r_2 SOC(t) \\ R_1(t) &= [r_3 + r_4 SOC(t)]^{-1} \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $E_{oc}(t)$ 为蓄电池开路电压; $R_{bat}(t)$ 为内阻,包括电解质电阻 $R_d(t)$ 和电解液电阻 $R_1(t)$; V_F 、 b 、 r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 为经验系数,在充电和放电模式下取值见文献^[17]。

2 优化配置模型

2.1 目标函数

本文建立了含有风力发电机、光伏阵列、蓄电池储能装置的独立供电微网容量优化配置模型,主要将设备投资成本、运行维护费用、蓄电池重置费用以及系统的能量过剩率 EER(Energy Excess Rate)和负载供电率 RLPS(Rate of Load Power Supply)计入到目标函数中。优化目的是使系统在满足可靠性的前提下,等值年投资费用最低。目标函数如下:

$$F = C(X) + \sigma_1 |\delta_{RLPS}(X) - \delta_{RLPSset}| + \sigma_2 \max[0, \delta_{EER}(X) - \delta_{EERset}] \quad (10)$$

其中, $C(X)$ 为微源配置成本; $\delta_{RLPS}(X)$ 、 $\delta_{EER}(X)$ 分别为系统实际的负载供电率和能量过剩率; $\delta_{RLPSset}$ 、 δ_{EERset} 分别为设定的负载供电率和能量过剩率; σ_1 、 σ_2 分别为惩罚因子,其随违反约束程度分段取值。

2.1.1 成本函数

成本函数中主要包括设备的投资成本、运行维护费用和蓄电池的重置费用,表示如下:

$$C(X) = \sum_{i=1}^N (C_{Afi} x_i + C_{Ami} x_i) + C_{Arep} N_{bat} \quad (11)$$

其中, N 为电源种类; $X = [x_1, x_2, \dots, x_N]$ 为优化变量,为风/光/储数量; x_i 为第 i 种电源的配置数量; C_{Afi} 为第 i 种电源等年值设备投资成本; C_{Ami} 为第 i 种微源的年运行维护费用; C_{Arep} 为蓄电池年均重置成本。

a. 设备年投资成本。

微源的装机成本与具体项目密切相关^[18]:

$$C_{Af} = C_{bd} \delta_{CRF}(\alpha, Y) \quad (12)$$

其中, C_{bd} 为装机成本; α 为折现率; Y 为微源服役年限; δ_{CRF} 为资金回收率 CRF(Capital Recovery Factor), 表达式如下:

$$\delta_{CRF}(\alpha, Y) = \frac{\alpha(1+\alpha)^Y}{(1+\alpha)^Y - 1} \quad (13)$$

b. 运行维护费用。

运行维护费用表示如下:

$$C_{Am}(w) = C_{Am}(1)(1+f)^w \quad (14)$$

其中, $C_{Am}(1)$ 为第 1 年的运行维护费用; $C_{Am}(w)$ 为第 w 年的运行维护费用; f 为全年通货膨胀率。

c. 蓄电池重置费用。

蓄电池的寿命与项目年限相比通常比较小, 因此需考虑其重置费用, 计算表达式如下^[19]:

$$C_{Arep} = C_{rep} \delta_{SFF}(\alpha, Y_{rep}) \quad (15)$$

其中, C_{rep} 为重置成本; Y_{rep} 为蓄电池重置寿命; δ_{SFF} 为偿债因子, 其表达式如式(16)所示。

$$\delta_{SFF}(\alpha, Y_{rep}) = \frac{\alpha}{(1+\alpha)^{Y_{rep}} - 1} \quad (16)$$

2.1.2 可靠性指标

本文采用负载供电率对系统的可靠性进行评价, 负载供电率表示评估期内系统能满足负荷需求的概率, 即:

$$\delta_{RLPS} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T P_{loss}(t)}{\sum_{t=1}^T P_{load}(t)} \quad (17)$$

其中, T 为评估时间; $P_{load}(t)$ 为第 t 小时系统总的负荷功率; $P_{loss}(t)$ 为第 t 小时负荷失电的功率。

显然, 微网系统的可靠性越高其负载供电率越大。

2.1.3 能量过剩率

独立微网存在能量浪费的现象, 本文通过能量过剩率来衡量系统能量的利用率, 定义为评估时间内系统浪费的能量除以系统总负荷, 即^[20]:

$$\delta_{EER} = \frac{\sum_{t=1}^T P_{exc}(t)}{\sum_{t=1}^T P_{load}(t)} \quad (18)$$

其中, $P_{exc}(t)$ 为第 t 小时系统过剩的功率。

显然, 能量利用率越高, 对应的系统能量过剩率就越低。

2.2 约束条件

2.2.1 数量约束

$$\begin{aligned} 0 &\leq N_{WG} \leq N_{WGmax} \\ 0 &\leq N_{PV} \leq N_{PVmax} \\ 0 &\leq N_{bat} \leq N_{batmax} \\ N_{WG}, N_{PV}, N_{bat} &\in \mathbf{N} \end{aligned} \quad (19)$$

其中, N_{WGmax} 、 N_{PVmax} 、 N_{batmax} 分别为最大可安装的风机台数、光伏电池块数和蓄电池单元组数; $\mathbf{N}$ 为自然数集合。

2.2.2 负载供电率和能量过剩率约束

$$\begin{aligned} \delta_{RLPS}(\mathbf{X}) &= \delta_{RLPSset} \\ \delta_{EER}(\mathbf{X}) &\leq \delta_{EERset} \end{aligned} \quad (20)$$

如式(10)中, 负载供电率以绝对值形式引入, 表示系统实际的可靠性必须等于设定的要求; 而能量过剩率以取较大值的形式引入, 表示系统实际的能量过剩率只需小于设定值即可。

2.2.3 蓄电池电量和功率约束

为了确保蓄电池的寿命和运行的安全可靠, 通常需要考虑蓄电池在充放电过程中的约束条件。

a. 荷电状态的约束。

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \quad (21)$$

其中, SOC_{min} 和 SOC_{max} 分别为蓄电池荷电状态的上、下限, 一般取 $SOC_{min} = 0.2$, $SOC_{max} = 1$ 。

b. 充放电功率的约束。

$$P_{ch}^{max}(t) = \min\{(SOC_{max} - SOC(t))C_{bat} / \Delta t, I_{ch}^{max}\} U_{bat}(t) \quad (22)$$

$$P_{dh}^{max}(t) = \min\{(SOC(t) - SOC_{min})C_{bat} / \Delta t, I_{dh}^{max}\} U_{bat}(t) \quad (23)$$

其中, $P_{ch}^{max}(t)$ 、 $P_{dh}^{max}(t)$ 分别为第 t 小时蓄电池允许的最大充电功率和放电功率; I_{ch}^{max} 、 I_{dh}^{max} 分别为蓄电池允许的最大可充、放电电流, 一般取额定容量的 20%。

3 微网容量最优配置

3.1 系统负载供电率和能量过剩率的计算

考虑风速和光照强度的随机性与波动性, 本文设计了 4 种不同情况(对应图 2 中子程序 A—D), 将一年划分为 8 760 h, 并假设风机和光伏阵列的输出功率在 1 h 内恒定, 依据各微源的数学模型计算第 t 小时风机和光伏的总发电量以及系统净负荷:

$$P_{WP}(t) = N_{WG} P_{WG}(t) + N_{PV} P_{PV}(t) \quad (24)$$

$$P_{net}(t) = P_{WP}(t) - P_{load}(t) \quad (25)$$

其中, N_{WG} 、 N_{PV} 分别为风机和光伏电池的数量; $P_{WG}(t)$ 、 $P_{PV}(t)$ 分别为风机和光伏阵列第 t 小时的输出功率; $P_{WP}(t)$ 为第 t 小时风机和光伏的总发电量; $P_{net}(t)$ 为第 t 小时系统净负荷。

A. 若 $0 < P_{net}(t) < P_{ch}^{max}(t)$, 蓄电池按式(7)充电。

B. 若 $-P_{dh}^{max}(t) < P_{net}(t) \leq 0$, 蓄电池按式(7)放电。

C. 若 $P_{net}(t) \geq P_{ch}^{max}(t)$, 以最大功率给蓄电池充电但能量仍有多余, 过剩功率 $P_{exc}(t)$ 为:

$$P_{exc}(t) = P_{net}(t) - P_{ch}^{max}(t) \quad (26)$$

D. 若 $P_{net}(t) \leq -P_{dh}^{max}(t)$, 蓄电池以最大功率进行放电仍无法满足负荷的需求, 失电功率 $P_{loss}(t)$ 为:

$$P_{loss}(t) = |P_{net}(t)| - P_{dh}^{max}(t) \quad (27)$$

在得到各时间段内系统的失电功率 $P_{loss}(t)$ 和过剩功率 $P_{exc}(t)$ 后, 根据式(17)、(18)可计算得到负载

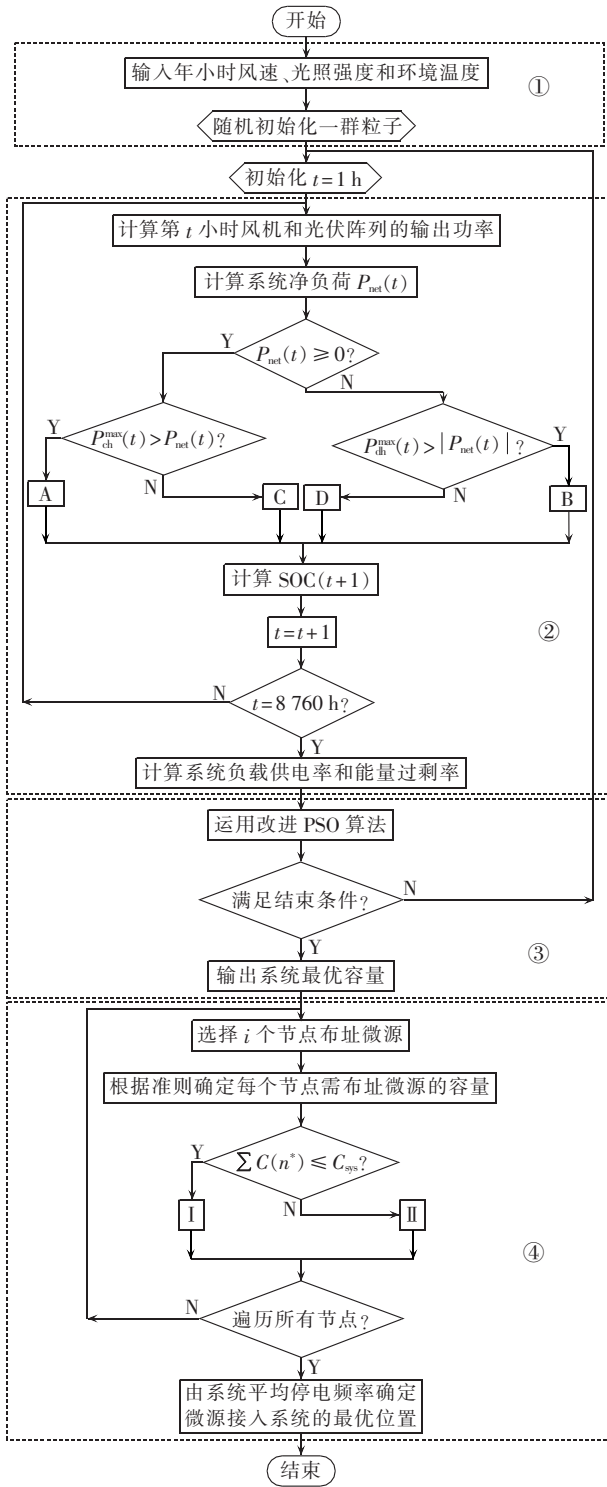


图 2 改进 PSO 微网容量优化配置流程

Fig.2 Flowchart of improved PSO for microgrid capacity configuration optimization

供电率和能量过剩率。

3.2 微源容量的合理配置

3.2.1 系统平均停电频率

在求得微网中分布式电源总容量后,本文通过计算不同情况下系统平均停电频率(SAIFI)指标将其合理地配置到系统中不同的节点处。微源布址于微网的不同节点,考虑线路可靠性指标 λ (次/(km·a))

以及各负荷节点与微源间的距离,每个节点的供电可靠性程度都将发生改变。

对于 m 个串联可修复元件,其等效可靠性为^[21]:

$$\lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_i \quad (28)$$

其中, λ_i 为第 i 条线路的可靠性指标。

对于 m 个并联可修复元件,其等效可靠性为^[21]:

$$\lambda = \prod_{i=1}^m \lambda_i \quad (29)$$

基于元件失效影响,系统中某负荷节点只有当布址于本地的微源失效,并且由其他可能供电的途径发生中断,此负荷才会发生停电故障。根据微源接入的位置、容量和系统结构,可依次求得每个节点由于线路故障而导致断电的概率,从而得到系统平均停电频率指标^[22]:

$$\delta_{SAIFI} = \frac{\sum_{i=1}^{N_L} N_i \lambda_i}{\sum_{i=1}^{N_L} N_i} \quad (30)$$

其中, N_L 为微网中负荷点的数量; N_i 为连接带负荷节点 i 的用户数量。

3.2.2 微源容量合理配置准则

孤岛中每个节点负荷的大小不尽相同,选择微源布址于该节点时,不能无约束地任意选择容量。本文通过以下准则确定负荷节点微源的容量。

选择系统中可能布址微源的节点,每个节点配置微源的容量由下式确定:

$$C(j^*) = C(j) + \min \{C(i), C(k)\} \quad (31)$$

其中, $C(j)$ 为节点 j 处负荷的大小; $C(i)$ 、 $C(k)$ 分别为与节点 j 相邻的节点 i 、 k 处负荷的大小; $C(j^*)$ 为节点 j 处应配置微源的容量。

当运用上述准则进行节点微源容量的选择时可能出现以下 2 种情况(分别对应图 2 中 I 和 II):

I. 若 $\sum C(n^*) \leq C_{sys}$, 则将剩余的微源布址在离系统最大负荷最近的节点处,其中 n 为系统中选择布址微源的节点, C_{sys} 为系统所需的微源容量;

II. 若 $\sum C(n^*) > C_{sys}$, 则微源按照相应节点负荷的大小布址,并将多余的容量布址在较大负荷处。

确定负荷节点微源容量后,以系统平均停电频率指标最小为目标确定微源接入系统的最优位置。

3.3 粒子群优化算法配置流程

风/光/储独立供电微网优化配置是一个在满足可靠性条件下的非线性寻优问题,其中约束条件(如可靠性、能量过剩率等)相比其他优化问题而言较多。若采用基本的粒子群优化(PSO)算法容易出现早熟和局部收敛等情况。因此,本文采用线性递减惯性权重的 PSO 算法(下文简称改进 PSO 算法),对目标函数进行直接搜索^[23-24]。

基于 PSO 算法的微网容量优化配置主要分四大步骤(见图 2):① 输入优化配置所需的一些基本数据,并随机初始化一群粒子;② 对每个粒子进行仿真,计算得到各自的负载供电率和能量过剩率;③ 采用改进的 PSO 算法确定微源的最优容量;④ 通过遍历的方法对微源容量进行合理的配置,确定其接入系统的最优位置。

4 算例分析

采用本文提出的优化配置策略对图 3 所示的 5 节点孤岛系统进行优化配置。其中,节点 1—5 所带的负荷数量分别为 100、300、450、50 和 100 户,各微源与当地负荷之间的线距离均为 30 m,假设在这 5 个节点中需选出 3 个节点配置 DG。微网中参数为:风机,额定功率 10 kW,切入风速 3 m/s,额定风速 11 m/s,切出风速 25 m/s,安装成本 205 088 元/台,运行维护成本 1 910 元/(台·a);光伏电池,开路电压 30.8 V,短路电流 8.7 A,最大功率电流 8.16 A,最大功率电压 24.5 V,安装成本 3 446 元/块,运行维护成本 13 元/(块·a);蓄电池,额定容量 100 A·h,电压 12 V,重置成本 1 148 元/块,安装成本 1 276 元/块,寿命 5 a,运行维护成本 13 元/(块·a)。由风速和光照强度的分布函数,利用 HOMER 软件仿真得到微网所在地年气象数据(包括风速、光照强度和环境温度)如图 4 所示,年负荷曲线如图 5 所示。仿真时间为 1 a,最小时间段为 1 h,粒子种群大小为 40,迭代次数为 100。

4.1 经济性分析

风/光/储独立微网能量过剩率 δ_{EERset} 均设为 100%,供电概率 $\delta_{RLJSset}$ 分别设定为 100%、99%、98% 的情况,微网电源优化结果如表 1 所示。

优化结果中能量过剩率 δ_{EER} 明显低于设定的 100%,这表明风机、光伏电池、蓄电池三者之间找到了功率平衡点。在满足相同负荷需求的情况下,当风机和光伏电池能量过剩时给蓄电池充电,不足时蓄电池进行放电,有效地降低了微网的年投资成本。但由于风机、光伏电池、蓄电池成本偏高,因此寻优所得等值年投资费用仍远高于从电网的购电

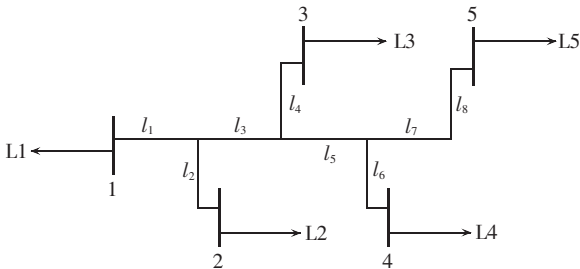
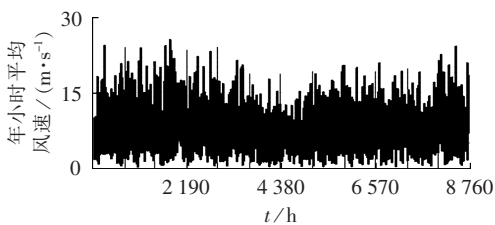
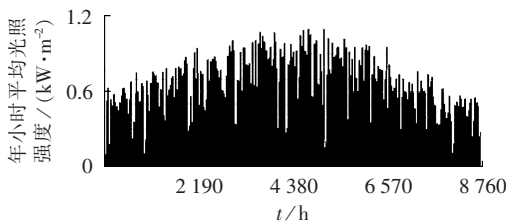


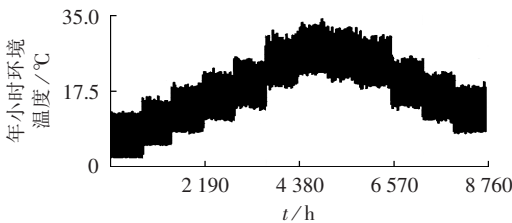
图 3 5 节点孤岛系统
Fig.3 Islanded five-bus system



(a) 年小时平均风速



(b) 年小时平均光照强度



(c) 年小时环境温度

图 4 微网所在地气象数据

Fig.4 Meteorological data of microgrid location

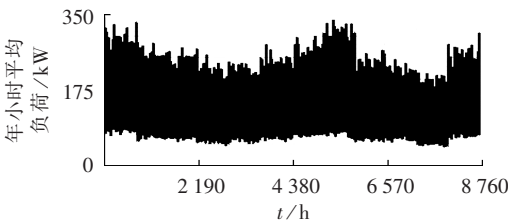


图 5 年小时平均负荷曲线

Fig.5 Hourly average loads of microgrid for a year

表 1 微源容量优化结果

Tab.1 Optimization results of microsource capacity

$\delta_{RLJSset}$	N_{WG}	N_{PV}	N_{bat}	δ_{RLJS}	δ_{EER}	年均成本/万元
1.00	36	1 016	562	0.999	0.68	140.598
0.99	35	827	438	0.990	0.63	109.805
0.98	33	804	357	0.980	0.55	99.138

成本,以目前的市场价格而言是不经济的。但对于一些大电网无法送电的岛屿、边远军哨所等特殊场合,不失为合适的选择,且随着技术的进步,风/光/储独立微网的经济性、节能减排功能将会得到体现。

4.2 可靠性对配置成本的影响

根据图 2 的流程,在设定相同的 δ_{EERset} 前提下,分别计算不同的可靠性指标 δ_{RLJS} 对方案年投资成本的影响,关系曲线如图 6 所示。

由结果分析可知:可靠性指标对经济性有重要的影响,可靠性设置得越高则微网的年投资费用相对就越高,经济成本随着可靠性的增加而增长。特

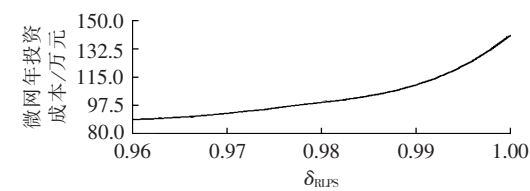


图 6 供电可靠性与年投资成本的关系
Fig.6 Relationship between power supply reliability and annual cost

别地,当可靠性指标在 99%~100%变化时,微网的年投资成本变化相对较大,这说明高要求的供电可靠性将会导致经济成本的迅速上升。因此,设定合理的可靠性指标能有效降低电源的冗余投资。

4.3 可靠性指标与能量过剩率的关系

分别计算以下 2 种情况。

a. 在能量过剩率 δ_{EERset} 为 100% 的前提下,计算可靠性指标 δ_{RLPS} 和能量过剩率 δ_{EER} 的关系,见图 7。

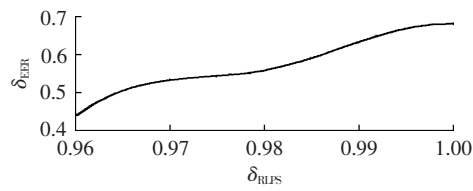


图 7 可靠性指标与能量过剩率的关系
Fig.7 Relationship between reliability index and energy excess rate

关系曲线表明能量过剩率随着可靠性指标设定的降低而逐渐递减,说明在供电可靠性放宽的条件下,系统可以在满足可靠性的同时减少微源的数量,从而降低年投资费用和能量的浪费。

b. 可靠性指标 $\delta_{RLPSset}$ 设定为 99% 的前提下,计算在设置不同能量过剩率的条件下,其对可靠性指标 δ_{RLPS} 的影响,如图 8 所示。

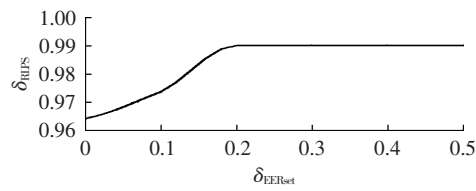


图 8 能量过剩率对可靠性指标的影响
Fig.8 Impact of energy excess rate on reliability index

由图分析可知,当能量过剩率 δ_{EERset} 设置较大时,优化结果 δ_{RLPS} 始终等于期望值 0.99,说明系统总能满足设定可靠性指标的要求,此时能量过剩率对可靠性不产生影响,即系统既能满足可靠性的要求,也能使能量过剩率在设定的范围内;而当 δ_{EERset} 逐渐减小到 0.2 附近时,发现求得的可靠性指标将小于设定值,说明系统已无法满足可靠性,以牺牲可靠性来满足能量过剩率的要求;当 δ_{EERset} 继续减小, δ_{RLPS} 将迅速减小,系统可靠性急剧降低。

上述分析说明可靠性指标与能量过剩率之间存在矛盾性:可靠性指标希望系统每时每刻都能满足负荷的需求,而能量过剩率则希望分布式电源输出的功率每时每刻不要有余,即理想情况为 DG 每时每刻满足负荷的需求且无能量浪费,一般情况无法达到。因此,决策者可根据实际系统设计的要求,在 PSO 算法寻优中选择相应目标的微网设计方案。

4.4 微源容量配置分析

对图 3 所示的系统,设计 2 种情况。其中线路长度分别如下。

情况 1: $l_1=l_2=\cdots=l_8=3\text{ km}$ 。

情况 2: $l_1=l_2=l_3=2\text{ km}$, $l_3=l_4=l_5=3\text{ km}$, $l_7=l_8=4\text{ km}$ 。

遍历系统中所有可能的情况,可以得到 2 种情况下微源布址在不同节点对应的系统平均停电频率,如表 2 所示。

表 2 微源布址节点与 SAIFI 的关系
Tab.2 Relationship between microsource site node and SAIFI

节点	δ_{SAIFI}		节点	δ_{SAIFI}	
	情况 1	情况 2		情况 1	情况 2
1,2,3	0.4206	0.3905	2,4,5	1.2681	0.9494
1,2,5	1.5575	1.2134	1,3,4	0.9839	0.8835
1,4,5	1.4738	1.0991	2,3,5	0.3493	0.2969
3,4,5	0.9477	0.7494	1,2,4	1.6701	1.3377
2,3,4	0.5358	0.5397	1,3,5	0.7974	0.6475

当微源按本文提出的准则确定节点容量时,上述 2 种情况下均为电源布址在节点 2、3、5 时 δ_{SAIFI} 最小。因此,节点 2、3、5 为微源接入系统的最优位置。同时分析微源布址在不同节点时 δ_{SAIFI} 值的大小得到如下结论。

a. 当节点 3 不布址微源时,系统的 δ_{SAIFI} 均偏高,因为节点 3 处对应的负荷最大,说明对于独立供电微网而言,为了降低由于线路故障而导致负荷断电的概率,首先应考虑在最大负荷处就地布址相应大小的微源,以保证重要负荷的供电可靠性。

b. 微源布址在相同节点上时,情况 2 计算得到的 δ_{SAIFI} 普遍低于情况 1,说明适当地缩短系统较大负荷之间的距离有利于降低由于线路故障而导致负荷断电的概率,从而提高负荷的供电可靠性。因此,在微网进行规划阶段时,应尽量缩短较大负荷之间的距离。

c. 将微源布址于节点 1、4、5 等负荷相对较小的节点上时,系统对应的 δ_{SAIFI} 均比较大,而布址于节点 2、3、5 时 δ_{SAIFI} 最小。由此可见,将微源布址在系统较小负荷处将极大降低系统的供电可靠性;相反,接入系统最大负荷处可靠性将显著提高,验证了本文方法的有效性和正确性。

在确定微源最优布址节点后,本文按节点负荷

的大小分配各微源的数量,节点 3 处负荷最大,则对应的风/光/储数量也就越多,其次是节点 2 和 5,在 $\delta_{RLFSset}=99\%$ 、 $\delta_{EERset}=100\%$ 时配置结果如表 3 所示。

表 3 节点配置风/光/储的数量
Tab.3 Number of wind/photovoltaic/storage configured at node

节点	N_{WG}	N_{PV}	N_{bat}
1	0	0	0
2	11	245	132
3	21	490	263
4	0	0	0
5	5	81	44

4.5 改进 PSO 算法寻优过程分析

本文采用改进 PSO 算法对风/光/储微网容量进行优化配置,在设定 $\delta_{RLFSset}=99\%$ 和 $\delta_{EERset}=100\%$ 的相同条件下,其与标准 PSO 算法的收敛曲线如图 9 所示。结果表明:在刚开始寻优时,由于粒子随机初始化导致 2 种算法的适应度值均很高,但改进 PSO 算法在迭代大约 20 次后就收敛于全局最优,收敛速度明显加快。改进的 PSO 算法具有群体智能算法并行搜索、易跳出局部最小的优点,并且整个优化过程仅耗时 55 s。

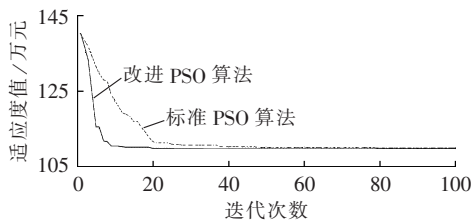


图 9 标准 PSO 和改进 PSO 算法的计算结果
Fig.9 Calculation results of standard and improved PSO algorithms

5 结论

本文提出一种基于可靠性的微网容量最优配置方法,通过仿真分析得出如下结论:

- a. 独立供电微网中风机、光伏、蓄电池三者之间能够找到功率平衡点,降低了年投资成本;
- b. 系统的可靠性是影响经济成本最重要的一个因素,经济成本随着可靠性的增加而增长,设定合理的可靠性指标能有效降低电源的冗余投资;
- c. 系统的可靠性指标与能量过剩率之间存在矛盾,两者不可能同时达到最优;
- d. 根据设定不同的可靠性指标和能量过剩率,改进 PSO 算法能够在保证系统供电可靠性的前提下,寻优得到相应的微网电源装机容量的最优配置方案,使经济成本最优;
- e. 通过系统平均停电频率指标,能有效地将微源布址于系统中负荷相对较大的节点,从而使整个系统由于线路故障而导致负荷断电的概率达到

最小。

参考文献:

[1] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化,2007,31(19):100-107.
LU Zongxiang,WANG Caixia,MIN Yong,et al. Overview on microgrid research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007,31(19):100-107.

[2] 王守相,王慧,蔡声霞. 分布式发电优化配置研究综述[J]. 电力系统自动化,2009,33(18):110-115.
WANG Shouxiang,WANG Hui,CAI Shengxia. A review of optimization allocation of distributed generations embedded in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33 (18):110-115.

[3] 石庆均,江全元. 包含蓄电池储能的微网实时能量优化调度[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):76-82.
SHI Qingjun,JIANG Quanyuan. Real-time optimal energy dispatch for microgrid with battery storage[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(5):76-82.

[4] 马溪原,吴耀文,方华亮,等. 基于可靠性评估的微电网配置方法[J]. 电力系统自动化,2011,35(9):73-78.
MA Xiyuan,WU Yaowen,FANG Hualiang,et al. Allocation of microgrid base on reliability evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(9):73-78.

[5] 江全元,石庆均,李兴鹏,等. 风光储独立供电系统电源优化配置[J]. 电力自动化设备,2013,33(7):19-26.
JIANG Quanyuan,SHI Qingjun,LI Xingpeng,et al. Optiaml configuration of standalone wind-solar-storage power supply system[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(7): 19-26.

[6] 王志群,朱守真,周双喜,等. 分布式发电接入位置和注入容量限制的研究[J]. 电力系统及其自动化学报,2005,17(1):53-57.
WANG Zhiqun,ZHU Shouzhen,ZHOU Shuangxi,et al. Study on location and penetration of distributed generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2005,17(1):53-57.

[7] VALLEM M R,MITRA J. Siting and sizing of distributed generation for optimal microgrid architecture[C]//Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium,2005. [S.l.]: IEEE,2005:611-616.

[8] SHEIDAEI F,SHADKAM M,ZAREI M. Optimal distributed generation allocation in distribution employing ant colony to reduce losses[C]//Proceedings of Universities Power Engineer Conference. Padova,Italy:[s.n.],2008:1-5.

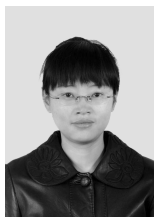
[9] 杨琦,张建华,刘自发,等. 风光储互补混合供电系统多目标优化设计[J]. 电力系统自动化,2009,33(17):86-90.
YANG Qi,ZHANG Jianhua,LIU Zifa,et al. Multi-objective optimization of hybrid PV/wind power supply system[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(17):86-90.

[10] 王瑞琪,李珂,张承慧. 基于混沌多目标遗传算法的微网容量优化[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(22):16-22.
WANG Ruiqi,LI Ke,ZHANG Chenghui. Optimization allocation of microgrid capacity based on chaotic multi-objective genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control,2011,39 (22):16-22.

[11] 马溪原,吴耀文,方华亮,等. 采用细菌觅食算法的风/光/储混合微电网电源优化配置[J]. 中国电机工程学报,2011,31(25):

- 17-25.
- MA Xiyuan, WU Yaowen, FANG Hualiang, et al. Optimal sizing of hybrid solar-wind distributed generation in an islanded microgrid using improved bacterial foraging algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 17-25.
- [12] 杨维军, 王斌. 二参数 Weibull 分布函数对近地层风速的拟合应用[J]. 应用气象学报, 1999, 10(1): 118-122.
- YANG Weijun, WANG Bin. Fitting to wind velocity of surface layer using two-parameter Weibull distribution function and its application [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1999, 10(1): 118-122.
- [13] 王成山, 郑海峰, 谢莹华, 等. 计及分布式发电的配电系统潮流随机潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 39-44.
- WANG Chengshan, ZHENG Haifeng, XIE Yinghua, et al. Probabilistic power flow containing distributed generation in distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 39-44.
- [14] PILLER S, PERRIN M, JOSSEN A. Methods for state-of-charge determination and their applications [J]. Power Sources, 2001, 96(1): 113-120.
- [15] ZAHEDI A, KALAM A. Balancing cost and performance in a PV/wind/battery hybrid power system [C] // Proceedings of Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC'00). Brisbane, Australia: [s.n.], 2000: 284-288.
- [16] GERGAUD O, ROBIN G, MULTON B, et al. Energy modeling of a lead-acid battery within hybrid wind/photovoltaic systems [C] // Proceeding European Power Electronics Conference. Toulouse, France: [s.n.], 2003: 1-10.
- [17] YANG Hongxing, LU Lin, ZHOU Wei, et al. A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system [J]. Solar Energy, 2007, 81(1): 76-84.
- [18] YANG Hongxing, ZHOU Wei, LU Lin, et al. Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind systems with LPSP technology by using genetic algorithm [J]. Solar Energy, 2008, 82(4): 354-367.
- [19] 胡骅, 徐冲, 吴汕, 等. 影响用户侧分布式发电经济因素分析[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(5): 29-33.
- HU Hua, XU Chong, WU Shan, et al. Analysis of factors influencing economy of customer-side distributed generation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(5): 29-33.
- [20] 石庆均. 微网容量优化配置与能量优化管理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- SHI Qingjun. Research on optimal sizing and optimal energy management for microgrid [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [21] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 145-150.
- [22] 李志奇, 吕林, 张然. 含微网的新型配电网可靠性分析[J]. 广东电力, 2012, 40(5): 803-807.
- LI Zhiqi, LÜ Lin, ZHANG Ran. Reliability of distribution network with microgrid [J]. East China Electric Power, 2012, 40(5): 803-807.
- [23] 李鹏, 李涛, 张双乐, 等. 基于混沌二进制粒子群算法的独立微网系统的微电源组合优化[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12): 33-38.
- LI Peng, LI Tao, ZHANG Shuang, et al. Combinatorial optimization of micro-sources in standalone microgrid based on chaotic binary particle swarm optimization algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12): 33-38.
- [24] 黄少荣. 粒子群算法研究综述[J]. 计算机工程与技术, 2009, 30(8): 1977-1980.
- HUANG Shaorong. Survey of particle swarm optimization algorithm [J]. Computer Engineering and Design, 2009, 30(8): 1977-1980.

作者简介:



王晶

王晶(1974-), 女, 河南邓县人, 副教授, 博士, 主要研究方向为电力系统建模、电能质量仿真与识别、人工智能方法在电力系统中的应用、微网控制与优化方法 (E-mail: kmhelen@zjut.edu.cn);

陈江斌(1990-), 男, 浙江海宁人, 主要研究方向为微网容量优化配置和能量管理 (E-mail: chenjiangbinzjh@gmail.com);

束洪春(1961-), 男, 江苏丹阳人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护和智能电网的稳定控制。

Microgrid capacity configuration optimization based on reliability

WANG Jing¹, CHEN Jiangbin², SHU Hongchun³

(1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. School of Electronics and Information, Tongji University, Shanghai 201804, China;

3. College of Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

Abstract: A capacity configuration optimization method based on reliability is proposed for standalone wind/photovoltaic/storage microgrid. The models of wind generator, photovoltaic array and storage battery are built with the consideration of random wind speed and light intensity, based on which, a configuration optimization model containing equipment investment, operation/maintenance cost, storage battery replacement, system reliability index and energy excess rate index is established, and the constraints are determined. The improved particle swarm optimization algorithm is adopted to solve it. The optimal configuration scheme of microsources is programmed in MATLAB and results show that, with the power supply reliability ensured, the optimized microgrid is more economic.

Key words: microgrid; optimization; capacity configuration; reliability; particle swarm optimization algorithm