

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.10.028

独立微电网微源多目标分层优化配置方法研究

李咸善¹, 邹芳¹, 李鑫燕², 周倩¹, 丁梦¹

(1. 三峡大学湖北省新能源微电网协同创新中心, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 微电源的优化配置是微电网设计规划阶段的重点,是实现微电网整个生命周期安全可靠经济运行的基础。文中提出了以负荷支撑最大和系统总成本最低为多目标的独立微电网微源优化配置方法。提出微电源配置要以保证电能质量及供电可靠性为前提,进而提出了相应的微电网组网规则,并验证了组网规则是微电源配置中必须遵守的规则之一;提出了将储能作为系统源储荷平衡的桥梁,以实现不可控微源的补充作用;还分析了系统备用度对微电源配置的影响,为微电网后续的扩展奠定基础。文中分别对2类微电源进行分析,采用分层优化方法进行求解,以提高优化速度及结果的准确性。第1层利用HOMER软件得出含不同类型微电源的系统生命周期成本最低的配置方案,从中筛选出满足组网规则的配置组合;第2层以第1层优化结果为初解,以负荷缺电率最低为目标应用粒子群算法求解,得到系统的最优配置方案。与纯运用粒子群算法相比,提出的方法能以更快的收敛速度实现微源容量配置的最优经济性和高供电可靠性。

关键词: 独立微电网; 组网规则; 备用度; HOMER; 粒子群算法

Multi-objective Hierarchical Optimal Configuration Method for Microsources of Stand-alone Microgrid

LI Xianshan¹, ZOU Fang¹, LI Xinyan², ZHOU Qian¹, DING Meng¹

(1. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid, China Three Gorges University,

Hubei Yichang 443002, China; 2. Key Laboratory of Hubei Province for Operation and Control of Cascade

Hydropower Stations, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China)

Abstract: The optimal sizing of microsources is the focus point at the planning stage of microgrid, and it is the basis for the entire life cycle of microgrid operating economically, safely and reliably. In this paper, a multi-objective microsources optimal configuration method of stand-alone microgrid considering the maximum load support and the lowest total system cost is proposed. To ensure power supply reliability and quality in a stand-alone microgrid system, the corresponding microgrid networking rules is put forward, and then verified that networking rules is one of the microsources configuration rules which must be followed; in order to achieve complementary effects of uncontrollable microsources, energy storage is proposed as a system balance of the bridge; the impact of the system reserve degree to microsources configuration is analyzed, which laid the foundation for future expansion of microgrid. In this paper, two types of micro-power are analyzed, using a hierarchical optimization method to improve the optimize speed and certainty of the results. The first layer is formed using HOMER software system to obtain the lowest lifecycle cost of different types of microsources configuration, and screened out combination which meets networking rules, the first layer results which as the initial solution is involved the second stage, using particle swarm algorithm to obtain the optimal configuration in which load power shortage the lowest as the target. Compared with pure particle swarm optimization, the method proposed in this paper can achieve the optimal economic supply capability and high reliability with a faster convergence rate.

Key words: alternating stand-alone microgrid; networking rules; reserve degree; HOMER; particle swarm algorithm.

收稿日期:2018-04-11; 修回日期:2018-06-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51277110)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51277110).

0 引言

微电源的优化配置是微电网规划设计中需要解决的首要问题,是实现整个生命周期系统效益最大化尤为重要的因素之一^[1]。多种微电源的不确定性、各负荷对可靠性的差别要求等都增加了独立微电网中微电源优化问题的难度。从供电可靠性来看,独立微电网因缺乏大电网的有效支撑,要满足系统长期稳定运行,需要配置可调可控性微源来保证敏感负荷的不间断供电,最大限度利用其他微源来实现更多的负荷支撑;从电能质量考虑,独立微电网也需要配置足够的可控性微源来实现对微电网的频率和电压支撑;就经济性而言,不同比例的微源配置导致系统的成本差异,而投资方往往将收益最优放在首位。因而微电网规划设计的目的是在对负荷需求和可再生能源资源情况进行充分分析预测的基础上,依据特定的目标和系统约束条件,确定系统结构及设备配置,尽可能实现系统经济性、环保性及能源利用效率等量化指标的优化^[2]。

目前,国内外关于微电网微源配置的研究已日趋成熟。文[3]以电能充裕度表征供电可靠性,采用非支配排序遗传算法求解不同目标下的风机和光伏阵列容量;文[4]建立了计及全寿命周期成本、负荷容量缺失率和污染物排放的多目标优化模型,对设备类型和装机容量同时优化,结果表明经济性与环保性、经济性与可靠性之间存在矛盾关系;文[5-6]从微电网内的电压及无功补偿方面来优化系统配置,有效抑制了电压波动、维持系统电压水平;文[7-10]分别建立了不同约束条件下的经济最优模型,求解不同微源组合下的最优配置容量;文[11-14]采用了不同的优化算法及优化软件求解出多目标下的优化配置,并验证其方法的合理性和优越性。以上代表性的研究中微源种类不同、优化方法各异导致了配置方案各具特点,满足了特定的需求,但对微电源配置的研究缺乏通用的参考意义。

文中提出独立微电网微电源的优化配置首先以保证电能质量和供电可靠性为前提,探讨了2类微源特性及相应配置规则,即微电网的组网规则,使独立微电网能够满足可靠性要求,并提供合格的电能质量;提出了将储能装置作为不可控微源的补充,以实现系统的源储荷平衡配置;然后分别建立微源的功率输出及成本模型,并以系统总成本最低及负荷支撑最大为双重目标,利用 HOMER 软件和粒子群算法进行分层优化,以更快速度得到满足双

目标最优的微源配置,验证组网规则在微电源优化配置中的基础作用;最后以备用度为连续变量,分析备用容量对系统配置的影响,为微电网后续的扩展奠定基础。

1 微电网的组网规则

文中定义微电网的组网规则是指微电网在设计及运行时,为了满足系统供电可靠性要求,同时满足对频率及电压的支撑要求,需要遵循的微源配置规则和负荷与微电源之间的匹配规则,以实现微电网的自治自愈功能。微电网的组网规则也可以以组网约束的形式引入微电网的优化设计及优化重构等相关研究的模型之中。

1.1 微电网的配置规则

微电网的分布式微源分为不可控微源(又称并网 DG)和可控微源(又称组网 DG)。

不可控微源主要指现代新能源发电系统,如光伏发电系统、风力发电系统等。不可控微源的特点是可再生能源,清洁环保,但其输出功率受环境变化的影响而具有间歇性、随机性,输出功率不可控制,一般工作在最大功率捕捉状态。

可控微源是指其功率可调的发电系统,如微型燃气轮机发电系统、柴油机发电系统、储能系统、小型水力发电系统等。其特点是其输出功率在一定范围内可以调节控制,快速跟踪负荷的变化。

建设微电网的目的之一是要充分发挥风力发电、光伏发电等不可控微源的供电效益、环保效益等,但由于不可控微源的输出功率受制于环境的变化,仅靠不可控微源供电难以保证微电网供电的可靠性和电能质量要求,所以在微网中必须配备可控微源来实现电能质量及供电可靠性要求。因而在微网规划及运行与控制时,需要遵循一定的规则来指导微源的配置。

文中提出的微电源的配置规则是指为了实现微电网频率及电压的支撑,需要配置足够容量的可控微源担任组网 DG,以保证微网电能质量要求。

1.2 负荷与微电网的匹配规则

按照负荷的性质和重要级别,将微电网中的负荷分为敏感负荷与非敏感负荷。敏感负荷是需要保证对其不间断供电的负荷;非敏感负荷则为可中断负荷。保证微电网系统供电的可靠性,就是要根据这两类负荷的特点,采取相应供电策略保证对其供电。为此,提出了负荷与微电源之间的匹配规则作为指导来达到这一目的。

负荷与微电源之间的匹配规则包括2个方面:
①敏感负荷要与组网DG处于同一供电馈线,以保证全生命周期内敏感负荷的不间断供电;②要因地制宜配置并网DG,充分发挥并网DG的供电效益,最大程度地实现对非敏感负荷的供电。该规则主要运用于微电网结构及微电源选址中,不再赘述。

2 独立微电网的微源模型

不失一般性,文中以含微型燃气轮机、风力发电机、光伏发电及储能装置的独立微电网为研究对象,对独立微电网的微源配置方法进行研究。首先需要建立微源的功率模型及发电成本模型,其中微源成本模型具有通用性,可以集中讨论。

2.1 微型燃气轮机模型

单轴微型燃气轮机具有结构紧凑、效率高、可靠性高的特点,是目前微电网中最为常用的小型热电联产的微源,发电系统结构主要由温度控制、速度控制、加速控制及燃料控制4部分构成,其结构见图1。

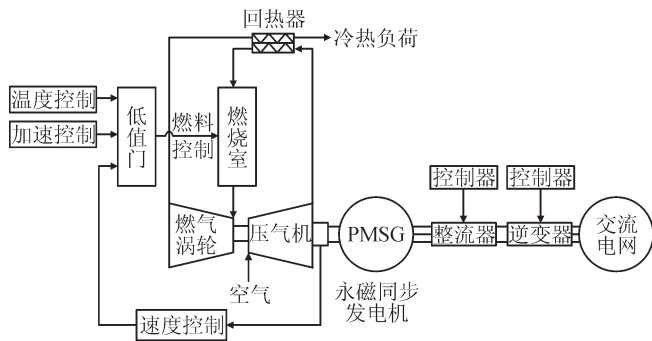


图1 导线单轴微型燃气轮机发电系统结构

Fig. 1 Block diagram of microturbine generation system

对于某一段剖分的线电荷,文[15]通过对微型燃气轮机发电系统的仿真建模,如实反映出自身的动态特性,结果表明空载时,转速达到额定值,当负载转矩增至100%时,转速略微下降,但都维持在额定转速附近。因而文中假定微型燃气轮机的功率输出稳定,能大幅度的平抑功率波动,其功率输出模型与集中式发电机组类似,则

$$P_{MT} = \frac{3U_{inv}E}{2X} \sin \delta_p \quad (1)$$

式(1)中: U_{inv} 和 E 分别是发电机出口电压和逆变器出口电压; δ_p 为两者的夹角; X 为逆变器的端口滤波器和滤波电感的等效电抗值。

微型燃气轮机的运行维护成本主要是指其天然气消耗量,微型燃气轮机消耗天然气量与输出功率的关系为

$$A_{na} = \frac{P_{MT}}{\eta H_{MT}} \quad (2)$$

式(2)中: A_{na} 、 P_{MT} 为微型燃气轮机消耗的天然气的量及输出功率; η 为发电效率; H_{MT} 为微型燃气轮机热值,参考文[12]取值 $9.7 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。

2.2 风力发电系统模型

风电机组的叶片从风中捕获部分能量转化为旋转的动能,再通过发电机将机械能转化为电能。忽略不同机组获取风速的差异,风力发电机的输出功率采用分段曲线描述^[14],即

$$P_{WT}(v) = \begin{cases} 0 & (v < v_c) \cup (v > v_f) \\ P_{WTN} \frac{v - v_c}{v_f - v_c} & v_c \leq v \leq v_N \\ P_{WTN} & v_N < v \leq v_f \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: $P_{WT}(v)$ 表示风速为 v 时对应的输出功率; P_{WTN} 为风机的单机额定功率; v_c 、 v_f 和 v_N 分别为切入、切出及额定风速。

当微网内含有 N_{WT} 台相同参数的风力发电机时,某时间段 T 内风力发电的平均输出功率为

$$P_{WT} = N_{WT} \int_0^T P_{WT}(v) f(v) dv \quad (4)$$

$$f(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (5)$$

式(4)、(5)中: $f(v)$ 为用双参数威布尔分布描述的概率密度函数;其中 $k(k > 0)$ 为形状参数; $c(c > 1)$ 为尺度参数,具体求解方法在文[8]中有叙述。

2.3 光伏发电系统模型

光伏发电系统一般由光伏阵列模块、逆变器和控制器3部分组成,光伏阵列的输出功率主要取决于太阳能辐射能量和电池板的工作温度^[13],即

$$P_{PV} = P_{STC} \frac{G_T}{G_{STC}} [1 + k_c (T_c - T_{STC})] \quad (6)$$

式(6)中: P_{STC} 为标准测试条件(太阳光入射强度 G_{STC} 为 $1000 \text{ W}/\text{m}^2$,环境参考温度 T_{STC} 为 25°C)下的最大功率; G_T 为入射到电池板的辐射量; k_c 为功率温度系数; T_c 为电池板的工作温度。

2.4 蓄电池模型

文中的储能装置选取简化动力电池(kinetic battery model, KiBaM),建模时忽略温度对电池容量的影响,并假定在单位步长内蓄电池的充放电电流恒定。荷电状态表征了蓄电池剩余容量占总容量的比例,当蓄电池为充电状态时,则

$$S_{soc}(t+1) = S_{soc}(t) + P_{ES}^c \Delta t / \eta_d \quad (7)$$

当蓄电池为放电状态时

$$S_{soc}(t+1) = S_{soc}(t) - P_{ES}^d \Delta t / \eta_d \quad (8)$$

式(8)、(9)中: $S_{\text{SOC}}(t+1)$ 、 $S_{\text{SOC}}(t)$ 分别为对应时段的蓄电池的剩余容量; P_{ES}^c 和 P_{ES}^d 为 t 时段的充电、放电功率; η_c 、 η_d 分别为蓄电池的充放电效率。

2.5 微电源的成本模型

独立微电网的成本模型中考虑了微源购置运行成本、能量浪费惩罚费用、治污费用和发电补贴等4部分,其中微源购置运行成本是指生命周期内微源的初始投资成本(考虑折旧因素)、运行维护成本和置换成本,描述如下。

$$C_{\text{DG}} = \sum_{j=1}^4 N_j (f_{\text{Dj}} C_{\text{Ij}} + C_{\text{Mj}} t_j + C_{\text{Rj}}) \quad (9)$$

式(9)中: C_{DG} 为折算到每年的微源购置运行成本; j 代表不同类型的微源; N_j 代表第 j 种微源的数目; C_{Ij} 、 C_{Mj} 和 C_{Rj} 分别为第 j 种微源的初始投资成本、运行维护成本和置换成本; f_{Dj} 为等年值折现系数。 r 为折现率, t_j 为第 j 种微源的使用年限,具体关系如下。

$$f_{\text{Dj}} = \frac{(1+r)^{t_j} r}{(1+r)^{t_j} - 1} \quad (10)$$

系统盈余功率为时间段 T 内微源功率之和与负荷所需总功率的差值,值若小于零,则应按负荷重要级别切除部分负荷至系统实现功率平衡;若大于零,则盈余的电能以发热或其他形式被消耗。为了防止系统容量配置过大而导致能源浪费,引入能量浪费惩罚费用^[7],即

$$P_{\text{sur}}(t) = \sum_{j=1}^4 N_j (P_{\text{MT}} + P_{\text{WT}} + P_{\text{PV}} + P_{\text{ES}} - P_{\text{L}}) \quad (11)$$

$$C_{\text{we}} = \int_0^T k_{\text{waste}} P_{\text{sur}}(t) dt \quad (12)$$

式(11)、(12)中: $P_{\text{sur}}(t)$ 为系统盈余功率; C_{we} 为能量浪费惩罚费用; k_{waste} 为单位电量的能量浪费惩罚系数。

微源中风机、光伏为清洁能源,蓄电池对环境的影响微弱,因此治污费用主要与微型燃气轮机排放的 CO_2 相关,微型燃气轮机运行时气体排放量与其出力成正比。

$$C_{\text{pc}} = \beta a T \sum_{t=0}^T P_{\text{MT}}(t) \quad (13)$$

式(13)中: C_{pc} 为治污费用; β 为治污单价(0.01元/kg); a 为标准情况下排放量(724.6 kg(MW·h⁻¹))。

微源中的风力发电和太阳能发电并网时,政府给予了相应补贴以支持可再生能源发电产业的发展,文中引入发电补贴为

$$C_{\text{ps}} = \sum_{j=1}^4 N_j p_{\text{ps}} (P_{\text{WTN}} + P_{\text{PVN}}) \quad (14)$$

式(14)中: C_{ps} 表示发电补贴; p_{ps} 为可再生能源的单位安装容量补贴(万元/kW); P_{WTN} 、 P_{PVN} 为风力发电机和光伏的单位安装容量。

3 独立微电网的微电源建模及求解

在已知风速条件、光照强度和负荷特征的情况下,以微电网需遵循的组网规则为前提,以系统总成本最低和负荷支撑最大为优化目标,以微型燃气轮机的台数、风力发电机的台数、光伏阵列及蓄电池的个数为优化变量: $[N_{\text{MT}} \ N_{\text{WT}} \ N_{\text{PV}} \ N_{\text{ES}}]$,对独立微电网的微源进行优化配置求解。

3.1 目标函数

3.1.1 独立微电网系统总成本最小

文中建立了含有微型燃气轮机、风力发电、光伏发电和蓄电池的独立微电网模型,其生命周期内的系统总成本函数主要计及微源购置运行成本、能量浪费惩罚费用、治污费用和发电补贴费用4部分,其表达式为

$$C_{\text{com}} = \min(C_{\text{DG}} + C_{\text{we}} + C_{\text{pc}} - C_{\text{ps}}) \quad (15)$$

式(15)中: C_{com} 表征独立微电网的系统总成本; C_{DG} 、 C_{we} 、 C_{pc} 、 C_{ps} 分别为式(9)、(12)、(13)、(14)表示的微源购置运行成本、能量浪费惩罚费用、治污费用及发电补贴。

3.1.2 微电网中负荷支撑最大

独立微电网运行阶段需要最大程度的支撑系统负荷,即对尽可能多的负荷可靠供电,采用负荷缺电率 f_{lps} 来表征系统供电的可靠性,见式(16)。负荷缺电率表示在评价周期 T 内的负荷缺电量与负荷总需求的比率。

$$f_{\text{lps}} = \min \frac{\sum_{t=1}^{8760} \sum_{j=1}^4 \{P_{\text{L}}(t) - N_j [P_{\text{MT}}(t) + P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{ES}}(t)]\}}{\sum_{t=1}^{8760} P_{\text{L}}(t)} \quad (16)$$

式(16)中: $P_{\text{L}}(t)$ 为 t 时刻系统的负荷; $P_{\text{MT}}(t)$ 、 $P_{\text{WT}}(t)$ 、 $P_{\text{PV}}(t)$ 、 $P_{\text{ES}}(t)$ 、 $P_{\text{ES}}(t)$ 分别为式(1)、(4)、(6)、(7)表示的微型燃气轮机、风力发电机、光伏发电以及蓄电池的有功功率。

3.2 系统的性能指标

3.2.1 系统的可靠性

负荷缺电率表示一定时间内系统发电功率不能满足负荷需求的概率,定义如式(16)所示。系统的负荷缺电率越低,意味着系统的可靠性越高。

3.2.2 风光互补度

文中采用风电与光伏的输出功率之和相对于负荷功率的波动率来表征风光互补特性^[10],即

$$C_{WP} = \frac{1}{\overline{P_L}} \sqrt{\frac{1}{N} [P_{WT}(t) + P_{PV}(t) - \overline{P_L}(t)]^2} \quad (17)$$

式(17)中: $\overline{P_L}$ 表示负荷的平均功率; N 为选取的评价周期内的点数; $P_{WT}(t)$ 、 $P_{PV}(t)$ 表示风机和光伏的输出功率。显然 C_{WP} 值越小,风光输出功率之和曲线与负荷曲线越吻合,表示风光互补特性越好。

3.2.3 系统备用度

负荷缺电率与常规大电网相似,微电网系统中除了需要满足当前的有功功率平衡要求,也须安排适当的备用容量。微电网规模小且负荷可预测性强,因而文中的备用容量定义为系统平均负荷的年增量,其大小定义为

$$\delta = (1 + \mu\%) \overline{P_L} \quad (18)$$

式(18)中: $\mu\%$ 表示系统中的备用度; $\overline{P_L}$ 为系统的平均功率。文中考虑的最低备用度为5%。

3.3 约束条件

3.3.1 系统运行约束

系统运行约束条件包括节点电压约束、备用容量约束和电源功率约束,分别见式(19)-(21):

$$(1 - 7\%)U_{iN} \leq U_i \leq (1 + 7\%)U_{iN} \quad (19)$$

$$\sum P_K \geq (1 + \mu\%)P_L \quad (20)$$

$$P_{Gi} \leq S_N \quad (21)$$

式(19)中任一节点的电压 U_i 的电压偏移允许为额定值 U_{iN} 的 $\pm 7\%$; 式(20)表示微电网中各微源总的最大输出功率 P_K 必须能满足系统的备用容量要求; 式(21)表示每一个微源的出力 P_{Gi} 在数值上不允许大于其额定功率 S_N 。

3.3.2 设备运行约束

风能与太阳能都存在随机性、间歇性及能量波动大等特点,单独的风力发电或光伏发电输出功率约束由设备本身控制,文中重点考虑微型燃气轮机的爬坡功率约束,见式(22)。储能装置的设备运行约束包括充放电功率限制、爬坡限制和储能荷电状态,见式(23)-(25)。

$$\begin{cases} P_{MT}(t) - P_{MT}(t-1) \leq P_{MT,up} & \Delta P_L \geq 0 \\ P_{MT}(t-1) - P_{MT}(t) \leq P_{MT,down} & \Delta P_L \leq 0 \end{cases} \quad (22)$$

$$-P_{ES,max} \leq P_{ES}(t) \leq P_{ES,max} \quad (23)$$

$$|P_{ES}(t) - P_{ES}(t-1)| \leq D_{ESS} \quad (24)$$

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq 1 \quad (25)$$

式(22)-(25)中: $P_{MT,up}$ 、 $P_{MT,down}$ 分别为微型燃气

轮机增加和降低有功功率的限值; D_{ESS} 为蓄电池功率的最大爬坡速度; $SOC(t)$ 为储能的荷电状态, SOC_{min} 为蓄电池的最小荷电状态限制; 规定 $P_{ES}(t)$ 为正值时代表蓄电池放电,为负值时代表蓄电池充电,即从其他微源处吸收有功功率。

3.3.3 系统性能指标约束

正常运行状态下,负荷缺电率只要在一个能够承受的范围即可,见式(26)。要充分利用风光互补特性,则需要使得系统的风光互补度小于参考值,见式(27)。系统的备用度表示系统可能出现的负荷增量,见式(28)。组网规则约束中需要不间断微源担任组网 DG 以维持系统的电压及频率支撑,见式(29)。

$$f_{lps} \leq f_{lps,R} \quad (26)$$

$$C_{WP} \leq C_{WP,R} \quad (27)$$

$$5\% \leq \mu\% \leq 15\% \quad (28)$$

$$S_{uni} \subset S \quad (29)$$

式(26)-(29)中: S_{uni} 表示含不间断微源的组合; S 表示系统配置中包含的所有微源种类。

3.4 优化配置模型的分层优化求解

针对目前独立微电网的微源优化配置不具备普遍适用性的问题,文中提出了采用 HOMER 软件和粒子群算法分层优化的求解方法。HOMER 软件是专门针对可再生能源发电系统配置分析的仿真软件,通过建立所需的微电网模型,手工录入数据后,采用枚举法模拟数以千计的系统配置来优化全寿命周期成本,列举输出最优量化配置结果,在结果中人工筛选出满足组网规则的配置组合,并输出作为第2层优化的初解。第2层优化采用粒子群算法,其本质上属于迭代的随机搜索算法,能以较大概率找到问题的全局最优解,鲁棒性好且计算效率高,依赖的经验参数较少^[6]。该分层优化思路的优点在于: HOMER 软件仿真采用枚举法,配置方案全面,省去了建立含各类微源的独立微电网模型的繁琐工作,可直接根据 HOMER 软件的配置结果人工筛选出符合组网规则等的配置方案(如风光燃、风光蓄、风燃蓄组合等)。这些方案为第2层求解提供了正确的优化方向,使得含不同类微源的配置结果在第2层优化后更具直观比较性,比直接采用粒子群算法具有更快的收敛速度,并能验证组网规则在微源配置中的基础作用。

提出的分层优化配置需采用2级处理模式,依次运用 HOMER 软件和 MATLAB 来实现:

1)第1层优化:在 HOMER 软件中建立所需的独立微电网模型,录入系统参数,仿真出系统生命周期

成本(式(9))最低的配置方案,人工选择出满足风光互补度(式(27))、组网规则约束(式(29))的配置组合 F_i 。

2)第2层优化:将包含不同种类微源的配置结果 F_i 导出作为粒子群算法中的初解,以负荷缺电率 f_{ips} 为目标函数优化 F_i 中各类微源容量,并求该情形下的系统总成本 C_{com} (式(15))。此外,由于微源容量优化配置实质目标为各类微源的数目,因此对粒子群算法中的位置公式改进见式(30)。

$$\begin{cases} x_m^{k+1} = x_m^k + f_{\text{loor}}(v_m^k) & v_m^k \geq 0 \\ x_m^{k+1} = x_m^k - f_{\text{loor}}(-v_m^k) & v_m^k < 0 \end{cases} \quad (30)$$

式(30)中: x_m^k 、 x_m^{k+1} 分别为第 m 个位置分量的第 k 次和第 $k+1$ 次的值; f_{loor} 为向下取整函数; v_m^k 为第 m 个速度分量的第 k 次的值。具体的计算步骤如下:

1)在 HOMER 软件中建立包含微型燃气轮机、风力发电机、光伏阵列和蓄电池以及逆变器的独立微电网模型。

2)录入数据和参数:全年的风速、光照曲线和负载数据,各类微源的特性(燃料的消耗量,污染排放,初始投资,运行维护费用等)。

3)第1层优化:HOMER 软件仿真求出含不同种类微源的优化配置组合 D_i 以及对应的微源购置运行成本 C_{DGi} ,并按照相应约束条件导出相应的配置组合 F_i 。

4)令 $i=1$,启动粒子群算法,将 F_i 中的第1种配置作为初解,初始化粒子群的位置和速度。

5)第2层优化:以最大负荷支撑为目标,求解最小的 $f_{\text{isp}}(i)$,及相应情形下的微电网系统总成本 $C_{\text{com}}(i)$,满足约束条件时输出并储存结果,同时令 $i=i+1$ 程序重复步骤4)。

文中采取的流程见图2。

4 算例分析

4.1 分层优化求解

文中选取文[16~17]中某地典型的年风速、年光照强度数据及年负荷数据,其中负荷平均功率160 kW,敏感负荷所占比例30%。综合文[12]及厂家数据,所选微型燃气轮机、风机发电机、光伏电池板及蓄电池的相关成本参数见表1。

在 HOMER 软件中建立含有微型燃气轮机、风力发电机、光伏及蓄电池的独立微电网模型,导入相关负荷及气象数据曲线,录入各微源的成本参数,设置系统备用度为5%,仿真计算步长为1 h,计算时间为全年8 760 h,经仿真含不同类型的微源的

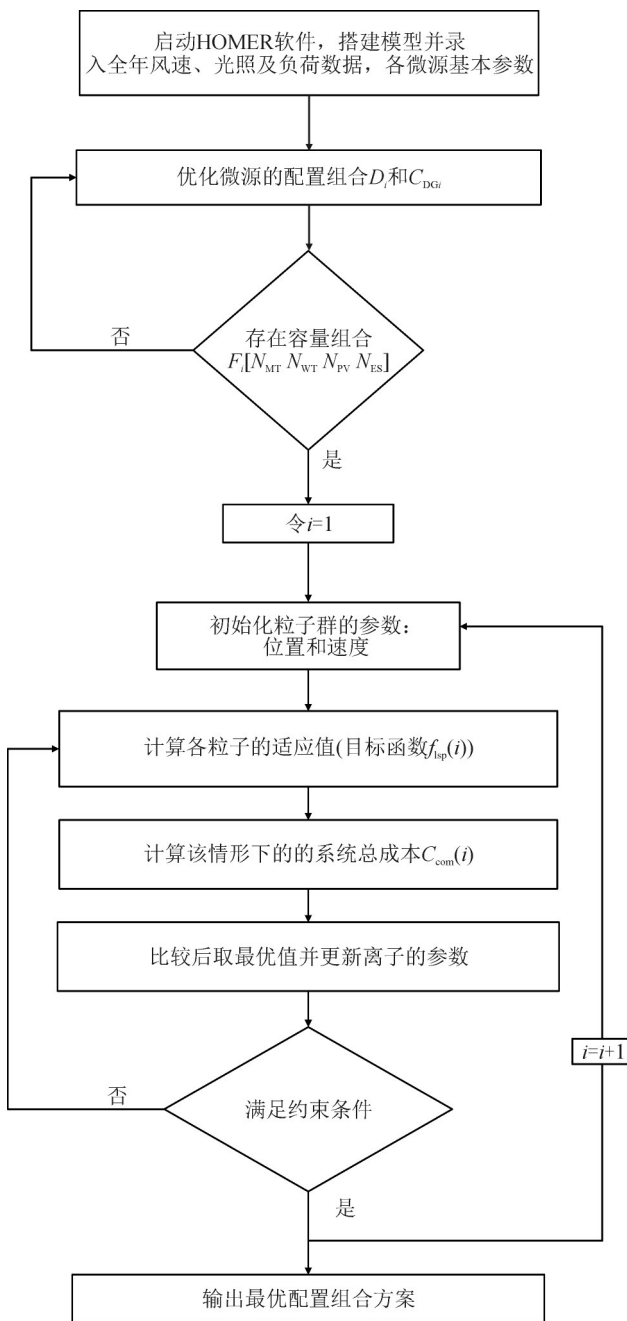


图2 微电源优化配置流程图

Fig. 2 Flow chart of the microsource optimal configuration

表1 各微源基本参数

Table 1 Basic parameters of each microsource

微源	单机容量/kW	初始成本/ 万元	维护成本/ 元	置换成本/ 万元
微燃	30.0	3.600	210.0	2.300
风机	10.0	2.805	143.0	3.250
光伏	0.2	0.104	6.9	0.029
蓄电	50.0(kW·h)	5.500	350.0	1.000

购置运行成本最低的配置组合,选择出满足风光互补度及组网约束的组合;继而将上述结果作为粒子群算法的初解,以负荷缺电率最低为优化目标,求

得各类组合中的最优容量配置结果见表2。

表2 系统最优配置结果

Table 2 Optimal capacity allocation of microsource

方案	微燃/台	风机/个	光伏/个	蓄电/个	$C_{\text{com}}/\text{元}$	C_{wp}	f_{ip}
1	3	28	3 250	39	1 125 350	1.28	0.030
2	—	24	5 168	62	1 286 123	1.35	0.065
3	5	31	5 064	—	1 304 503	1.32	0.040

表2中方案配置中至少包含一种可控微源,以满足保证电能质量和供电可靠性的理论要求。其中方案1为独立微电网的微电源配置的最优结果:风机和光伏的互补特性高,储能装置相对较少,系统的可靠性最高且系统总成本最低,实现了独立微电网微源的多目标分层优化配置。该配置结果与组网规则最相符,其中微型燃气轮机担任组网DG,不可控微源及储能装置共同担任并网DG,实现了微电网的可靠性、经济性联合最优。方案2未配置微型燃气轮机,仅依靠储能装置导致了系统的可靠性偏低。方案3中风光互补发电盈余时没有储能装置对其消纳吸收,造成了一定的能源浪费,全靠微型燃气轮机补充系统的功率差额,加重了系统的投资成本。

据配置结果比较风光互补特性与蓄电池的关系,见图3。由图3可知,风光互补度值越小,所需的蓄电池的容量越小。储能装置的充放电特性使得它作为不可控微源的有力补充,来实现可再生风光资源的高效应用。若配置中舍弃储能设备,打破了源储荷平衡中储能的桥梁作用,会导致风光互补盈余的电能被浪费,而出力不足时需要启动微型燃气轮机来实现微电网的不间断供电。

4.2 备用度对配置方案的影响

系统备用容量是指在实际所需发电容量的基础上新增的备用额度,防止由于负荷需求的突然增加、可再生能源出力的突然下降所引起的功率缺额^[3]。系统备用度由5%逐渐递增至15%来模拟不同时间段出现的负荷变化,经分层优化后的配置见图4。从图4可知,当系统的备用度增加时,各微源的配置容量都有所增加,但微型燃气轮机和蓄电池的变化幅度大,由此可知微型燃气轮机和蓄电池等可控微源更大程度的承担了系统备用容量配置。

系统备用度与负荷缺电率之间存在着反比关系,见图5。系统备用容量的增加伴随着系统的负荷缺电率降低,主要是由于微型燃气轮机和蓄电池在维持系统的稳定中起主导作用,可控微源的增加提高了系统的可靠性,也从另一面验证了组网规则在微源配置的基础作用。

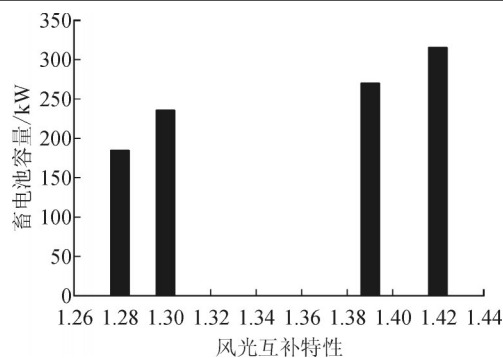


图3 风光互补特性与蓄电池的关系

Fig. 3 Relationship between wind/PV complementary nature and the energy source

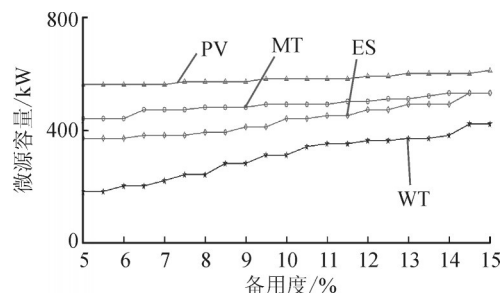


图4 不同备用度下的微源配置结果

Fig. 4 Microsource configuration under different reserve degree

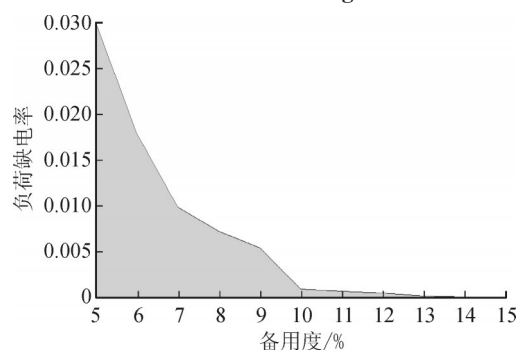


图5 系统备用度与负荷缺电率的关系

Fig. 5 Relationship between the system load power shortage and the reserve degree

4.3 分层优化算法与其他算法的对比分析

文中分别采用分层优化算法和粒子群算法求解,二者的收敛曲线见图6,结果表明:采用HOMER软件及粒子群算法的分层优化算法的收敛速度较快,且简单高效的实现了各类配置的横向对比,具有实际工程意义。

5 结语

文中提出微电源配置优化要以保证电能质量及供电可靠性为前提,进而提出了相应的微电网组网规则。以包含2类微源的独立微电网为例,搭建各微源的功率输出及成本模型,并以系统总成本最低和负荷支撑最大为双目标,采用HOMER软件和

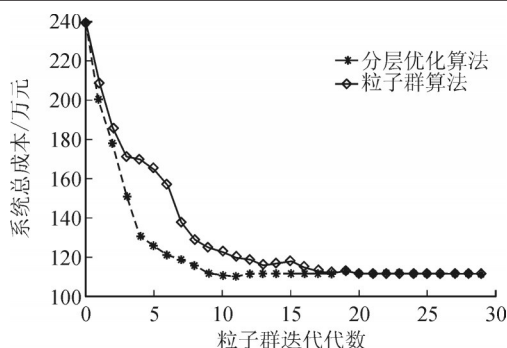


图6 不同算法的计算结果

Fig. 6 The results of different algorithms

粒子群算法分层优化求解,由配置结果可知含有微型燃气轮机、风机、光伏和储能装置的组合方案与组网规则最相符,在满足系统源储荷平衡的基础上提高了系统的可靠性,且蓄电池的配置使得不可控微源的互补度增高,获得了更高的经济效益。因此独立微电网规划时必须包含至少一个组网DG,来维持运行中系统的功率平衡、电压及频率支撑,同时因地制宜的开发新能源,形成若干的并网DG以保证更多负荷的连续供电。此外选择合适的系统备用度对微电网可控微源的配置有显著影响作用,也能相应的提高系统的可靠性。综上所述,微电网规划设计应根据当地可再生能源资源分布情况及负荷需求确定可靠的微源种类、合理的微源容量,使其长期支撑更多的负荷运行,避免重复冗余投资。

参考文献:

- [1] 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.
- [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] 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.
- [4] 郭力,刘文建,焦冰琦,等.独立微网系统的多目标优化规划设计方法[J].中国电机工程学报,2014,34(4):524-536.
GUO Li, LIU Wenjian, JIAO Bingqi, et al. Multi-objective optimal planning design method for stand-alone microgrid system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4):524-536.
- [5] 邓威,李欣然,刘志勇,等.考虑无功补偿影响因素的间歇性分布式电源综合优化配置[J].中国电机工程学报,2012,32(10):12-80.
DENG Wei, LI Xinran, LIU Zhiyong, et al. Comprehensive optimal allocation of intermittent distributed generation considering reactive power compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(10):12-80.
- [6] 陈秋南,韦钢,朱昊,等.风电/微型燃气轮机混合微电网电压波动优化控制[J].电力系统自动化,2014,38(9):226-231.
CHEN Qiunan, WEI Gang, ZHU Hao, et al. Optimal control of voltage fluctuations of wind power/microturbine hybrid microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9):226-231.
- [7] 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. Optimal configuration of standalone wind-solar-storage power supply system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7):19-26.
- [8] 符杨,蒋一璠,李振坤.基于混合量子遗传算法的微电网电源优化配置[J].电力系统保护与控制,2013,41(24):50-57.
FU Yang, JIANG Yiliu, LI Zhenkun. Optimal allocation of distributed generation for microgrid based on hybrid quantum genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24):50-57.
- [9] 余金龙,赵文会,赵波,等.基于多状态建模的独立型微网优化配置[J].电力系统自动化,2015,39(6):11-17.
YU Jinlong, ZHAO Wenhui, ZHAO Bo, et al. Optimal configuration of standalone microgrid based on multistate modeling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6):11-17.
- [10] 张建华,于雷,刘念,等.含风/光/柴/蓄及海水淡化负荷的微电网容量优化配置[J].电工技术学报,2014,29(2):102-112.
ZHANG Jianhua, YU Lei, LIU Nian, et al. Capacity configuration optimization for island microgrid with wind/photovoltaic/diesel/storage and seawater desalination load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2):102-112.
- [11] 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.
- [12] 马溪原,吴耀文,方华亮,等.采用改进细菌觅食算法的

- 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.
- [13] 肖 峻, 白临泉, 王成山, 等. 微网规划设计方法与软件[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25):149-157.
- XIAO Jun, BAI Linquan, WANG Chengshan, et al. Method and software for planning and designing of microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25):149-157.
- [14] 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.
- [15] 刘 君, 穆世霞, 李岩松, 等. 微电网中微型燃气轮机发电系统整体建模与仿真[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7):85-89.
- LIU Jun, MU Shixia, LI Yansong, et al. Overall modeling and simulation of microturbine generation systems in microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7):85-89.
- [16] YAZDANPANA M A. Modeling and sizing optimization of hybrid photovoltaic/wind power generation system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 6(3):49-61.
- [17] 武 星, 殷晓刚, 宋 昕, 等. 中国微电网技术研究及其应用现状[J]. 高压电器, 2013, 49(9):142-149.
- WU Xing, YIN Xiaogang, SONG Xin, et al. Research on microgrid and its application in China[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 49(9):142-149.
- 李咸善(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事微电网运行与控制研究。

(上接第 169 页)

- LIU Sifeng, XIE Naiming. Grey systems and application[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [22] 邓聚龙. 灰色理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002:300-309.
- DENG Julong. The basis of grey theory[M]. Wuhan: Press of Huazhong University of Science and Technology, 2002: 300-309.
- 尹 晖(1962—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为空间信息处理理论和方法。
- 周晓庆(1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为空间信息处理理论和方法。