

文章编号:1006-2467(2022)12-1598-10

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.402

适应多场景的微电网一体化柔性规划方法

潘险险¹, 陈霆威², 许志恒¹, 王天伦², 张俊潇¹

(1. 广东电网有限责任公司 电网规划研究中心, 广州 510080;

2. 广州市奔流电力科技有限公司, 广州 510640)

摘要: 为了提高微电网建设运维的经济性, 满足多种不同类型微电网对可靠性的个性化需求, 提出一种适应多场景的微电网一体化柔性规划方法. 以类型与组成判断结果为依据, 建立包含容量规划与网架规划的双层模型. 下层容量规划以微源建设运行成本最小为目标, 采用混合整数优化算法求解; 上层网架规划以网络建设运行成本最小为目标, 采用粒子群算法求解, 形成了组成判断-容量规划-网架规划的闭环一体化规划系统. 系统可通过灵活调整独立运行持续时间约束以及对负荷停电重视程度参数, 满足不同微电网对可靠性的个性化需求. 算例表明: 所提方法可有效降低微电网的建设运维成本, 对多种类型与组成、多种可靠性需求的场景均具有良好的适应性.

关键词: 微电网; 一体化; 双层模型; 多场景; 柔性规划

中图分类号: TM 614; TM 615 **文献标志码:** A

A Multi-Scenario Integrated Flexible Planning Method for Microgrid

PAN Xianxian¹, CHEN Tingwei², XU Zhiheng¹, WANG Tianlun², ZHANG Junxiao¹

(1. Grid Planning and Research Center, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China; 2. Guangzhou Power Electrical Technology Co., Ltd., Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to improve the economy of microgrid construction and operation, and meet the personalized demand for reliability of various types of microgrids, an integrated flexible planning method for microgrid is proposed to adapt to multiple scenarios. Based on the judgment results of type and composition, a two-layer model including capacity planning and grid planning is established. The lower-level capacity planning takes the minimum operation cost of micro-source construction as the goal and adopts the mixed integer optimization algorithm to solve it. The upper layer grid planning takes the minimum cost of network construction and operation as the goal, and uses the particle swarm optimization algorithm to solve it. A closed-loop integrated planning system consisting of judgment, capacity planning, and grid planning is formed. The system can meet the personalized reliability requirements of different microgrids by flexibly adjusting the independent operation duration constraints and the load outage attention parameters. The example shows that the proposed method can effectively reduce the construction and operation cost of microgrid, and has a good adaptability to different types and components and different reliability requirements.

收稿日期: 2021-10-12

基金项目: 中国南方电网公司规划专题项目(031000QQ00200006)

作者简介: 潘险险(1989-), 女, 江西省九江市人, 工程师, 主要研究方向为配电网规划研究.

通信作者: 陈霆威, 男, 硕士生, 电话(Tel.): 13929936098; E-mail: 1838063537@qq.com.

Key words: microgrid; integration; two-layer model; multiple scenarios; flexible planning

微电网是指由分布式电源(Distributed Generation, DG)、能量转换装置、负荷、监控和保护装置等汇集而成的小型发配电系统,是一个可以实现自我控制、保护和管理自治系统^[1],既可以接入配网并网运行,也可以应用于海岛、乡村等大电网不适于延伸的偏远地区独立运行.微电网可有效解决 DG 大规模接入的问题,是具有间歇性与波动性等分布式 DG 与电网之间的有效“桥梁”.未来在“碳达峰”与“碳中和”目标下,随着 DG 的进一步发展和高渗透率,微电网作为 DG 分布式利用的一种有效形式,更将成为电网的智慧“积木块”,成为服务于能源转型战略、实现电能高效清洁转换与资源协调配置的重要组网形态^[2-5].

微电网规划技术的研究是微电网高效运行以及未来蓬勃发展的基础^[6],当前研究多为单一的容量规划或网架规划.其中,容量规划的研究主要是对某一特定类型微电网的规划,多侧重于对源和储的规划,通常应保证电源容量充足,足够支撑微电网范围的负荷,并保证一定的供电可靠性,在此基础上尽可能提升经济性,调整能源的容量比例以降低发电、供电成本^[7-10].但是,微电网建设运行的经济性与可靠性存在一定冲突.如何实现不同场景下经济性与可靠性的平衡是容量规划的一个难点.而网架规划的研究则主要是考虑对网络可靠性的处理^[11-14].网架规划对于可靠性的处理多考虑微电网运行时线路损耗导致的成本,负荷量大的节点需要距离微源更近以减小线路损耗,这样也实现了经济性与可靠性的统一.但这种方法对可靠性的衡量相对固定,无法满足不同场景对可靠性的不同需求.而且,这些文献大多未考虑节点负荷重要程度对可靠性的影响,以及网络故障可能导致的用户停电损失,在实际应用中存在一定的局限性.结合微电网发展的新形势,微网将面临可能高达 100%的可再生能源渗透率,以及负荷从“被动”用电到“主动”用电的转变,对微网内源储荷的融合有着更高的要求.实际上容量规划和网架规划是互相影响、相辅相成的.因此,仅对容量或者网架进行规划,实际上都很难达到微网规划的最优.

为此,提出一种适应多场景的微电网一体化规划方法,针对容量规划与网架规划的不同特点建立双层模型:上层以经济性最优为目标建立容量规划模型,通过独立运行持续时间等约束来保证微电网

的可靠性,采用混合整数优化算法求解;下层以经济性最优为目标,考虑实际运行时可能出现的用户停电损失,建立网架规划模型,采用粒子群优化算法求解,通过判断规划结果的合理性形成反馈通道,实现容量与网架规划的统一.

1 一体化规划方法

微电网可接入的微源种类多样,在不同场景下可能存在多种不同的微源组合,如何协调不同微源间的建设与使用,以及合理规划可控电源与不可控电源的比例,将明显影响微电网建设的经济性与可靠性.此外,负荷的重要程度与可靠性需求将对规划结果产生明显影响.因此在网架规划时,需要充分考虑用户对可靠性的需求,从而减小线路故障造成的损失.

进一步结合对已有微电网示范工程与研究的相关分析,可知,有效的微网规划需要解决以下关键问题:

(1) 新能源机组的接入从根本上改变了传统电网“源随荷动”的运行模式.可再生能源种类的多样性与出力的不可调度性导致了微电网组成的多样性.在规划时应考虑不同微电网的组网特点,建立能满足大多数微电网规划需要的普适性模型.

(2) 微电网对可靠性的要求存在个体差异,不同类型与不同重要程度的负荷停电造成的损失不尽相同.根据规划地区实际规划需要,建立的模型应能满足不同可靠性场景的需要.并且,需要从源、荷双侧同时进行,而不能局限于源对微电网可靠性的影响.

(3) 运行的多场景性以及源储荷的灵活性,使得微网规划中容量规划和网架规划相辅相成、不能割裂.两者同时受到场景对经济性、环保性与可靠性的需求变化影响,应当通过一定的方法实现两者的统一.

为此,提出一种适应多场景的微电网一体化柔性规划方法,由微电网的类型与组成判断、容量规划以及网架规划 3 部分组成,如图 1 所示.其中,“适应多场景”主要指适用于多种不同类型、不同组成的微电网;“柔性”主要指可通过灵活调整可靠性参数以满足不同微电网建设对可靠性的个性化要求;“一体化”则主要指系统整体既有前向层层递进通道,又通过评价系统合理性和有效性的判断形成多层闭环反

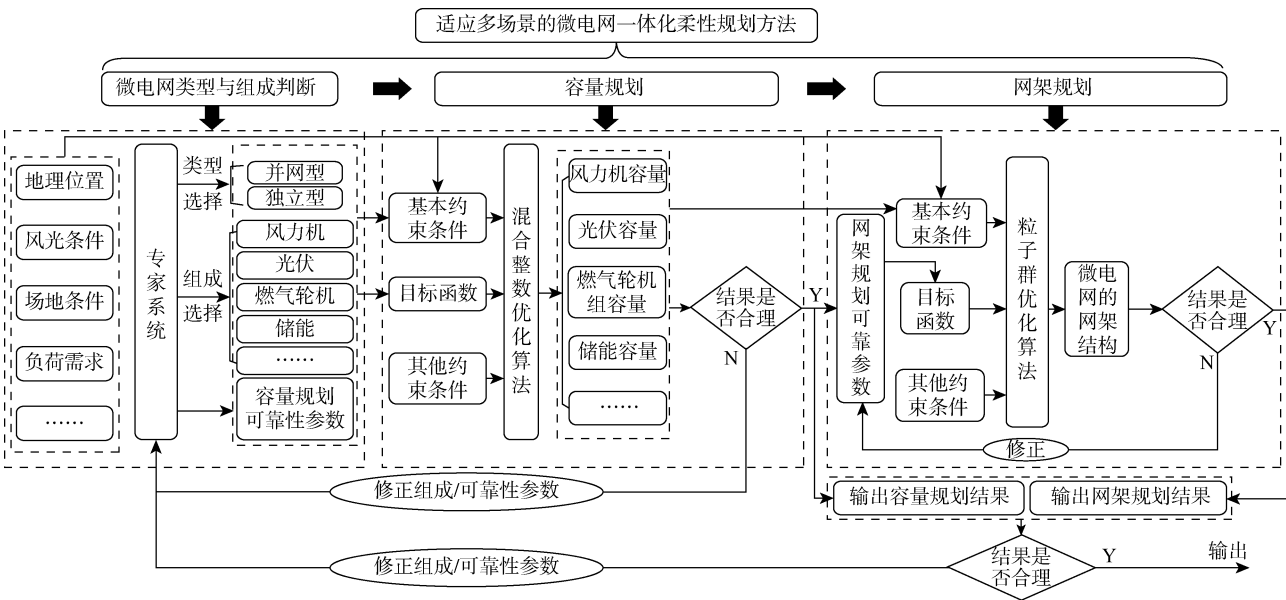


图 1 适应多场景的微电网一体化柔性规划方法框架示意图

Fig. 1 Framework of multi-scenario integrated flexible planning method for microgrid

馈,完成微网规划“类型与组成判断、容量规划以及网架规划”的大闭环。

2 模型的建立

2.1 微电网类型与组成判断

微电网类型与组成判断是进行微电网规划的基础。不同规划地区的风光和场地条件等各不相同,其微电网的建设目标与对可靠性的要求也不相同。因此在微电网规划前,需要对规划地区进行资料收集,通过专家系统初步确定微电网的类型与组成,确定对可靠性的重视程度,并根据实际情况得到相关约束作为后续微电网规划的限制条件。

其中,微电网的类型判断为确定规划地区建设的是并网型微电网还是独立型微电网,需要依据规划地区资源情况、负荷需求以及建设目标等共同确定。微电网的组成判断则需要确定在微电网什么位置适合建设何种类型的机组或储能,完成机组选型,并根据场地条件确定允许的机组装机容量范围。此处可根据已建设的示范工程大数据进行数据挖掘,形成专家库,完成组成初判。

2.2 下层容量规划模型

独立型微电网可看作与电网交互电量为 0 的特殊并网型微电网,不失一般性,以并网型微电网作为规划对象。在考虑满足负荷供电需求的前提下,以总费用最小为目标,并综合考虑 DG 的环境效益和网络的可信性水平,建立微电网容量规划模型。

2.2.1 目标函数

$$\min C = C_{DG} + C_{DGY} + C_{DGF} +$$

$$C_{CN} + C_{HJ} - C_{HB} + C_{PCC} \quad (1)$$

式中: C_{DG} 为 DG 年投资费用; C_{DGY} 为 DG 年运行维护费用; C_{DGF} 为 DG 年燃料成本; C_{CN} 为储能年投资费用; C_{HJ} 为 DG 年环境成本; C_{HB} 为环保补贴; C_{PCC} 为网络购电成本。分别定义如下:

$$C_{DG} = \sum_{i \in F} c_i^{DG} \frac{r(1+r)^q}{(1+r)^q - 1} \quad (2)$$

式中: F 为 DG 种类的集合; c_i^{DG} 为系统设备投资等年值; r 为贴现率,取 10%; q 为考虑设备更换在内的一个投资周期长度,取 10 年。

$$C_{DGY} = \sum_{t=1}^T \sum_{i \in F} c_i^{DGY} E_{i,t} \quad (3)$$

式中: c_i^{DGY} 为系统设备单位电量的运行维护费用; $E_{i,t}$ 为系统设备在 t 时刻至 $t+1$ 时刻的发电量; T 为数据时段总数。

$$C_{DGF} = \sum_{t=1}^T c_F E_{MT,t} \quad (4)$$

式中: c_F 为燃气轮机/柴油机机组(简称机组)单位电量的燃料成本; $E_{MT,t}$ 为机组 t 时刻至 $t+1$ 时刻的发电量。

$$C_{CN} = c_{CN} \frac{r(1+r)^q}{(1+r)^q - 1} \quad (5)$$

式中: c_{CN} 为所有储能设备一次总投资。

$$C_{HJ} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 (A_j^v + A_j) \omega_j E_{MT,i} \quad (6)$$

式中: j 为污染物的种类,包括 SO_2 、 NO_x 、 CO_2 共 3 类; A_j^v 表示第 j 种污染物的环境价值; A_j 表示第 j 种污染物排放应缴纳的罚款; ω_j 为机组每发单位电

量的污染物排放水平。

$$C_{HB} = \sum_{t=1}^T c_{NE}^E E_{MT,t} \quad (7)$$

式中: c_{NE}^E 为具有环保效益的 DG 单位电量的环保补贴。

$$C_{PCC} = \sum_{t=1}^T c_{pcc,t} E_{pcc,t} \quad (8)$$

式中: $c_{pcc,t}$ 为 t 时刻至 $t+1$ 时刻的交易电价, 假定交易电价在一定时段内保持不变, 且微电网向上级电网购售电的价格相同; $E_{pcc,t}$ 为 t 时刻至 $t+1$ 时刻微电网与上级电网交易能量。

2.2.2 约束条件

(1) DG 装机容量约束. 受场地、自然资源和电网条件的限制, 风力机、光伏阵列可装设的数量有限. 风力机、光伏等 DG 的装机容量约束为

$$G_{a,\min} \leq G_a \leq G_{a,\max} \quad (9)$$

式中: $G_{a,\min}$ 为装机容量下限; $G_{a,\max}$ 为装机容量上限; G_a 指代 G_{WT} 、 G_{PV} 、 G_{MT} , 分别为风力机(WT)、光伏(PV)、机组(MT)实际装机容量。

(2) 可再生能源比例约束. 对于并网型微电网, 为了充分消纳可再生能源, 一般要求可再生能源装机容量不小于微电网总装机容量(G_{all})的 50%^[15], 即有

$$G_{WT} + G_{PV} \geq 0.5 G_{all} \quad (10)$$

(3) 储能约束. 考虑到储能设备的损耗和其能量存储时间上的耦合性等因素, 约束条件如下:

$$\left. \begin{aligned} G_{CN,\min} &\leq G_{CN} \leq G_{CN,\max} \\ P_{ch,\min} &\leq P_{ch,t} \leq P_{ch,\max} \\ P_{dis,\min} &\leq P_{dis,t} \leq P_{dis,\max} \\ P_{ch,t} \cap P_{dis,t} &= 0 \\ W_{CN,t} &= W_{CN,t-1}(1-\mu) + (P_{ch,t} - P_{dis,t})\Delta t \\ S_{\min}^{SOC} &\leq S_t^{SOC} \leq S_{\max}^{SOC} \\ S_1^{SOC} &= S_T^{SOC} \\ S_t^{SOC} &= \frac{W_{CN,t}}{G_{CN}} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: $G_{CN,\min}$ 、 G_{CN} 和 $G_{CN,\max}$ 分别为储能装机容量的下限、实际值和上限; $P_{ch,\min}$ 、 $P_{ch,t}$ 和 $P_{ch,\max}$ 分别为储能的最小、实际和最大充电功率; $P_{dis,\min}$ 、 $P_{dis,t}$ 和 $P_{dis,\max}$ 分别为储能的最小、实际和最大放电功率; $W_{CN,t}$ 为储能 t 时刻的剩余能量; μ 为表示储能能量自然耗散的自损耗率; Δt 为每个时段的长度; S_{\min}^{SOC} 、 S_t^{SOC} 和 S_{\max}^{SOC} 分别为储能电池荷电状态(State of Charge, SOC)允许最小值、在 t 时刻的值和允许最大值. 为了避免储能设备因过充、过放导致寿命快速减小, 且保证在微电网实际工况与预期工况不同时

时储能可提供足够的容量调节冗余度, 一般要求储能 SOC 值范围为 0.2~0.9, 令储能初始 SOC 与结束时的 SOC 保持一致, 以满足储能的可持续使用。

(4) 电量交易约束:

$$\left. \begin{aligned} P_{pcc,t} &\leq P_{pcc,\max} \\ \sum_{t=1}^T P_{pcc,t} &\leq 0.5 \sum_{t=1}^T P(t)\Delta t \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: $P_{pcc,t}$ 为 t 时刻微电网与上级电网联络线上的实际功率; $P_{pcc,\max}$ 为该联络线可承受的最大传输功率; $P(t)$ 为 t 时刻的负荷总功率. 为了保证微电网的相对独立运行, 要求微电网与上级电网的全年电能交易量不超过微电网全年用电量的 50%^[15]。

(5) 全网功率平衡约束:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{b \in Y} P_b(t) + P_{pcc}(t) &= P(t) \\ Y &= \{WT, PV, MT, CN\} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: $P_b(t)$ 为 t 时刻风力机、光伏、机组、储能(CN)的出力. 对于并网型微电网, 要求在任何时刻微电网与上级电网断开连接时, 均能保证对微电网内负荷一段时间的持续供电^[15]. 以 2 h 为例, 约束条件如下:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{d \in Y'} P_d(t+1)\Delta t + P_d(t)\Delta t + W_{CN}(t) &\geq \\ P(t)\Delta t + P(t+1)\Delta t \\ t &= 0, 1, \dots, n-1 \\ Y' &= \{WT, PV, MT\} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

要求对 t 的所有取值式(14)均成立。

(6) DG 功率约束. DG 出力不能超出 DG 的装机容量范围, 即:

$$\left. \begin{aligned} 0 &\leq P_d(t) \leq G_d \\ d &\in \{WT, PV, MT\} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

2.3 上层网架规划模型

将微电网的容量规划结果作为已知条件, 进行微电网的网架规划. 并网型微电网与独立型微电网的网架规划类似. 并网型微电网可通过公共接入点(Point of Common Coupling, PCC)与上级电网连接, 规划要素更多, 场景更复杂, 因此以并网型微电网为例, 以微电网建设与运营成本最小为目标, 建立网架规划模型。

2.3.1 目标函数 考虑到网架的投资回收期 and DG 有所不同, 规划模型采用最小化网络费用作为优化目标, 包括线路投资、网络损耗成本和用户停电损失费用, 目标函数如下式所示:

$$\min C = C_{line} + C_L + kC_{com} \quad (17)$$

式中: C_{line} 为线路投资费用的等年值; C_L 为网络损耗年费用; k 为衡量对用户停电重视程度的参数; C_{com}

为用户停电损失费用. 目标函数体现了对经济性与可靠性的要求, 其中有

$$C_{\text{line}} = F_{\text{line}} \frac{r(1+r)^m}{(1+r)^m - 1}$$

(18)

式中: F_{line} 为线路初始投资费用; m 为线路经济使用寿命, 一般架空线路取 30 年, 电缆取 40 年.

$$C_L = \sum_{t=1}^T c_F E_t$$

(19)

式中: E_t 为 t 时段网络损耗的总电量. 这里将网络损耗成本用损耗电量对应的燃料成本进行等价.

在微电网运行时可能因线路故障导致用户停电, 将微电网运行时各条线路故障导致的停电损失之和作为总的用户停电损失费用:

$$C_{\text{con}} = \sum_{l \in L} \sum_{e=1}^3 p_l^{\text{com}} c_e^{\text{com}} p_{e,l}^{\text{com}} t_{e,l}^{\text{com}}$$

(20)

式中: L 为当前网架结构中线路的集合; p_l^{com} 为线路 l 的故障概率; c_e^{com} 为重要程度为 e 用户单位停电损失费用, 不同重要程度的负荷其单位停电损失费用不同; $p_{e,l}^{\text{com}}$ 为线路 l 故障时重要程度为 e 的用户总停电电量.

2.3.2 约束条件

(1) 节点功率平衡约束. 节点功率平衡约束要求各节点功率输入量等于节点功率输出量, 即:

$$\left. \begin{aligned} P_{x,t} &= \sum_{\substack{y \in L \\ H(y)=x}} P_{x,y,t} \\ Q_{x,t} &= \sum_{\substack{y \in L \\ H(y)=x}} Q_{x,y,t} \end{aligned} \right\}$$

(21)

式中: P_x 和 Q_x 分别为从节点 x 输入到微电网的有功功率和无功功率; $H(y)$ 为与 x 节点连接的所有线路集; $P_{x,y}$ 和 $Q_{x,y}$ 分别为从节点 x 向节点 y 输送的

有功功率和无功功率.
(2) 节点电压约束. 节点电压约束要求各节点电压保持在允许范围内, 以保证供电质量和网络稳定, 即:

$$U_{x0,\min} \leq |U_{x0}| \leq U_{x0,\max}$$

(22)

式中: $U_{x0,\min}$ 和 $U_{x0,\max}$ 分别为节点 x 允许电压最小值和最大值; U_{x0} 为节点 x 的电压水平, 且

$$U_{x0} = U_{y0} + \frac{P_L(y,x)R_{y,x} + Q_L(y,x)X_{y,x}}{U_{y0}} + j \frac{P_L(y,x)X_{y,x} - Q_L(y,x)R_{y,x}}{U_{y0}}, y \in N_x$$

(23)

式中: N_x 为除 x 点以外节点的集合; $P_L(y,x)$ 和 $Q_L(y,x)$ 分别为节点 y 向节点 x 传输的有功功率和无功功率; $R_{y,x}$ 和 $X_{y,x}$ 分别为节点 y 与节点 x 之间的线路电阻和电抗.

(3) 支路潮流约束. 支路潮流约束要求各条支路的传输容量之和小于线路可承受容量的极限, 即:

$$\left. \begin{aligned} S_{x,y} &\leq S_{x,y,\max} \\ S_{x,y} &= \sqrt{P_L(x,y)^2 + Q_L(x,y)^2} \end{aligned} \right\}$$

(24)

式中: $S_{x,y,\max}$ 为节点 x 与节点 y 间线路允许传输容量 $S_{x,y}$ 的最大值.

(4) 连通性约束. 连通性约束要求网架结构应保证规划地区没有孤立节点的存在. 此外, 由于微电网中储能的接入带来了可靠性水平的明显提升, 没有通过环状接线进一步提高供电可靠水平的必要性, 因而较多地采用了辐射状的接线模式, 网架结构中不应出现环.

3 一体化规划算法流程

所提双层规划算法实现流程如图 2 所示. 容量

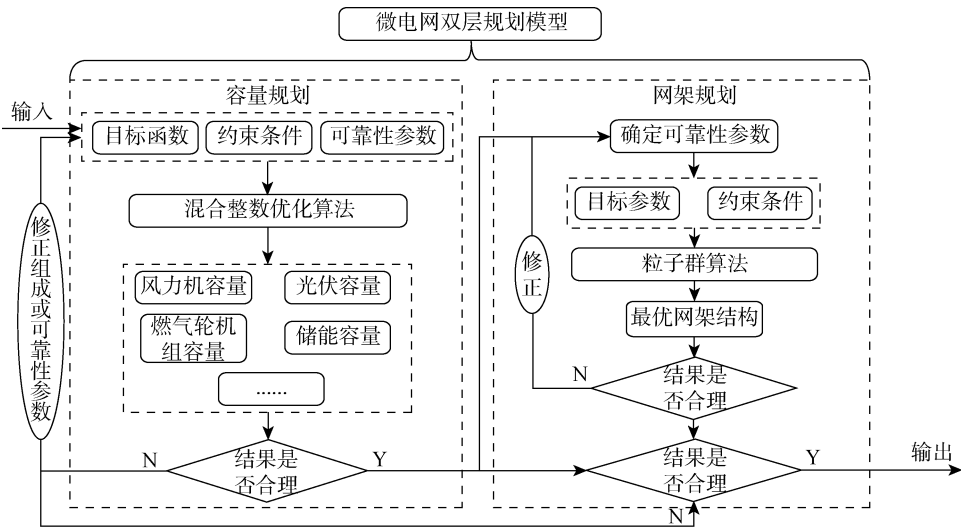


图 2 微电网双层规划模型流程图
Fig. 2 Flow chart of two-layer planning model of microgrid

规划部分主要根据规划地区实际条件,判断微电网的基本类型与组成,以建设运行总成本最小为目标,兼顾可靠性与环保性要求,建立相应的微电网容量规划模型,并采用混合整数优化算法求解得到各组成的最优容量配置.网架规划则根据容量规划结果,确定可靠性参数,以建设运行总成本最小为目标,兼顾微电网的可靠性要求,建立网架规划模型,并采用粒子群优化算法求解得到最优网架结构.

整个规划系统在容量规划内部闭环和网架规划内部闭环基础上,容量与网架规划相辅相成,形成统一的大闭环系统,交叉迭代并进行修正,直到规划结果符合实际要求.

4 仿真与实验

以某 10 节点城市地区的 10 kV 微电网规划为例,以该城市地区的典型日负荷数据与风光数据替代全年数据,采用“风+光+燃+储”的并网型微电

网组网方式,建立微电网一体化规划模型,验证所提模型的有效性,并讨论不同可靠性参数下所得规划方案的经济性.图 3 为该地区的网架结构图,(1)~(20)为线路编号;图 4 为各节点负荷量(P_n)变化曲线;表 1 为各节点负荷重要程度;表 2 为对应线路的长度参数,线路采用 LGJ-185 型架空线线路.该电网拟与上级电网连接的节点为节点 9,联络线功率传输不得超过 1 000 kW.此外,该城市地区采用分

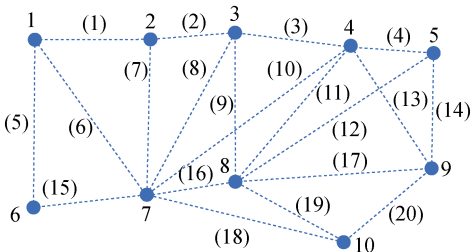


图 3 规划地区微电网网架结构图

Fig. 3 Grid structure of microgrid in planning area

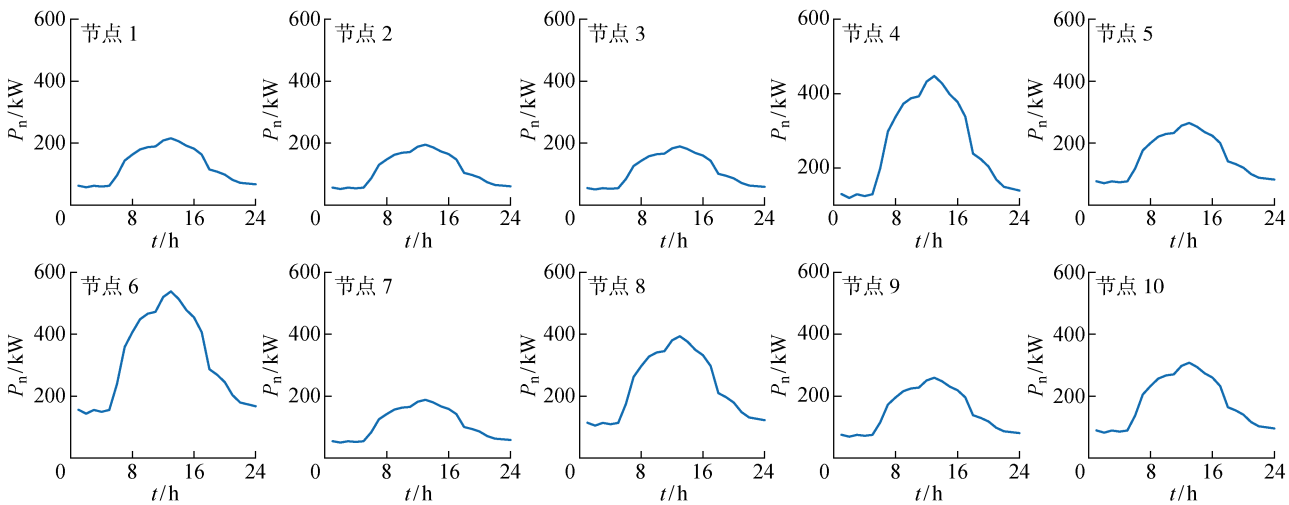


图 4 各节点负荷量变化曲线图

Fig. 4 Curve diagram of load change for each node

表 1 各节点负荷重要程度

Tab. 1 Importance of load at each node

节点 编号	e	$c^{\text{com}} /$ (元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	节点 编号	e	$c^{\text{com}} /$ (元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)
1	二级	8.8	6	二级	8.8
2	一级	13.5	7	三级	3.6
3	一级	13.5	8	三级	3.6
4	三级	3.6	9	三级	3.6
5	一级	13.5	10	二级	8.8

表 2 各线路长度参数

Tab. 2 Length of each line

线路编号	长度/km	线路编号	长度/km
(1)	0.93	(11)	1.38
(2)	0.62	(12)	1.81
(3)	0.75	(13)	1.25
(4)	0.60	(14)	1.05
(5)	1.26	(15)	0.95
(6)	1.52	(16)	0.64
(7)	1.17	(17)	1.37
(8)	1.36	(18)	1.42
(9)	1.12	(19)	0.87
(10)	1.75	(20)	0.74

时电价机制,各时段微电网向大电网的购售电价格如表 3 所示.

表 3 分时电价
Tab. 3 Time-of-use price

时间段	电价/(元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)
23:00—7:00	0.471 1
7:00—9:00,12:00—14:00	0.626 6
16:00—19:00,21:00—23:00	
9:00—12:00,14:00—16:00	1.034 7
19:00—21:00	

根据规划地区风光、场地和负荷条件等信息,选择各机组的型号.各机组对应的参数如下:额定功率为 30 kW,初始投资费用为 7000 元/kW,运行维护费用为 0.3 元/kW;单个光伏阵列的额定功率为 10 kW,初始投资费用为 6 195 元/kW,运行维护费用为 0.2 元/kW;燃气轮机的单位电量燃料费用为 0.63 元,初始投资费用为 1.911 万元/kW,运行维护费用为 0.035 8 元/kW;储能的自损耗率为 0.04,最大充电与放电速率分别为 SOC 的 0.2 和 0.4,充放电效率为 0.95,正常运行 SOC 范围为 0.2~0.9,初始投资费用为 5 400 元/(kW·h),储能的初始 SOC 设为 0.5.图 5 为选定的风力机与光伏在该地区的出力(P')预测曲线.各机组在微电网中适宜接入的位置与最大接入容量如表 4 所示.

此外,燃气轮机的典型污染物 SO₂、NO_x 和 CO₂ 的排放数据分别为 0.000 928、0.618 8、184.082 9 g/(kW·h).典型污染气体的环境价值标准及罚款标准如表 5 所示,可再生能源机组的环

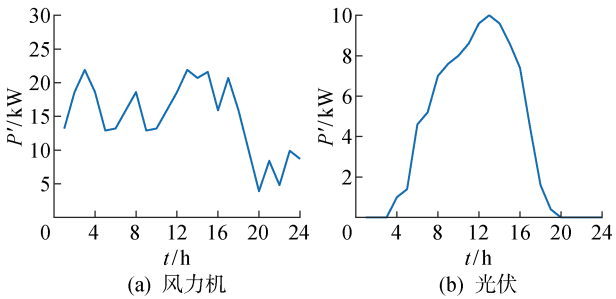


图 5 DG 出力预测曲线
Fig. 5 Curve diagram of DG output prediction

表 4 DG 与储能的接入约束
Tab. 4 Access constraints of DG and energy storage

类型	接入节点位置	最大接入容量/kW
储能	1	3 000
燃气轮机	9	2 000
风力机	5	1 500
光伏	10	1 500

表 5 典型污染气体的环境价值及罚款标准
Tab. 5 Environmental value and penalty standard for typical polluted gases

污染物类型	环境价值	罚款标准
SO ₂	6	1
NO _x	8	2
CO ₂	0.023	0.01

保补贴均为 0.2 元/(kW·h).

设该并网型微电网要求任何时刻转入独立运行时均能保证微电网内符合持续供电 2 h,对用户停电重视程度的参数 $k=0$.粒子群算法初始种群数为 5,惯性权重为 0.9,自我学习因子为 1,群体学习因子为 2,粒子群的最大迭代次数为 50.

5 结果与分析

根据上述城市地区规划相关信息,求解得到城市地区并网型微电网“风+光+燃+储”容量规划结果,为了突出可靠性对容量规划的结果,设置该并网型微电网在任何时刻转入独立运行时均保证微电网内持续供电 24 h,采用独立型微电网的方法进行规划,即“孤岛规划,并网运行”的结果作为对比,如表 6 所示.

表 6 “风+光+燃+储”容量规划结果
Tab. 6 Capacity results of wind-solar-fuel-storage

规划模型选择	容量/kW				总成本/元
	光伏	风力机	燃气轮机	储能	
并网型	1 150	1 350	31.7	2 446.6	4 959 915.52
独立型	1 330	570	1 255.0	100.0	5 997 266.08

可见,在该场景下光伏与风力机的规划容量均远高于燃气轮机的规划容量.由于向上级电网获取电能与燃气轮机机组出力均能为微电网提供稳定可控的电能,而向上级电网购电经济性更好,因此燃气轮机规划容量很小.在该场景下可再生能源得到充分利用,但可再生能源机组出力变化速度快、出力峰谷差大,需要配有较大容量的储能.当采用独立型微电网的方法进行规划时,燃气轮机容量明显上升,微电网可控电量来源的比例明显提高,储能规划容量明显降低,总成本增加了约 20.91%,通过牺牲经济性获得了较高的供电可靠性.

此外,该场景下微电网燃气轮机组的规划容量较小,考虑到燃气轮机配套设施的建设情况,其性价比可能进一步降低.此时可判断为规划结果不合理,返回专家系统将微电网的组成修正为“风+光+

储”的并网型微电网,重新进行容量规划的结果如表 7 所示.

可见,放弃燃气轮机的使用后总成本增加了约 0.45%,增幅极小,在工程实际中经济性可能更优. 因此,在该场景下,根据规划地区实际情况可灵活选择“风+光+燃+储”或“风+光+储”的微电网组成.

根据城市微电网规划相关信息以及“风+光+燃+储”容量规划结果,求得网架结构优化结果如图 6 所示;其规划成本,即线路投资费用的等年值与线路损耗费用之和如表 8 所示.

表 7 “风+光+储”容量规划结果

Tab. 7 Capacity results of wind-solar-storage

容量/kW				总成本/元
光伏	风力机	燃气轮机	储能	
1070	1 620	0	2 327.4	4 982 158.75

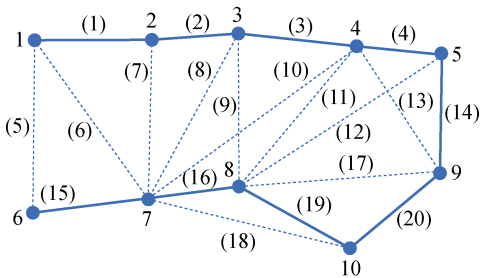


图 6 网架结构优化结果图($k=0$)

Fig. 6 Graph of optimal grid structure ($k=0$)

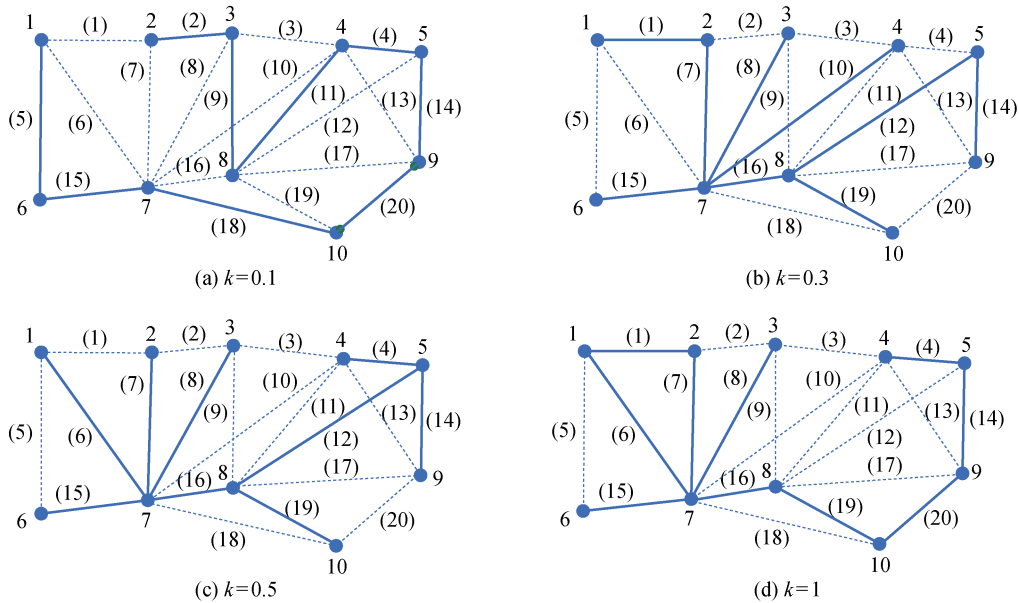


图 7 不同 k 值下网架结构图

Fig. 7 Diagram of grid structure at different k values

表 8 网架结构优化结果
Tab. 8 Optimization results for grid structure

k 值	网架方案	规划成本/元
0	(1),(2),(3),(4),(9), (15),(16),(19),(20)	13 589 890.90

随着迭代次数的增加,规划总费用逐渐下降,当迭代次数进行到 16 次后,规划结果基本不再变化. 在不考虑可靠性因素下,倾向于将满足约束的最短线路的组合作为最优网架结构. 但该网架结构存在几点明显不足:含有储能的节点 1 位于线路末端,当网架出现断路故障时将导致调节能力的大幅下降;重要程度较高、负荷量较大的节点 6 与电源节点间的线路长度较长,线路(15)、(16)、(19)其一发生故障都将导致严重的用户停电损失.

因此,在实际规划时需要考虑到用户供电的可靠性. 调整对可靠性的重视程度 k 值,可得在对负荷重要性重视程度不同的情况下的网架结构,如图 7 所示;对应网架规划结果如表 9 所示. 可见,随着 k 值的增大,线损与建设费用对网架规划的影响减小,电源与多个重要负荷连接距离缩短,在微电网内部线路故障时造成的用户停电损失降低,使得网架整体的可靠性增强,DG 的经济效益和社会效益得以更为充分地发挥. 而网架规划的实际总成本随着 k 值增加呈现总体上升趋势,经济性有所下降,部分长度较长但连接重要负荷节点的线路开始加入到规划结果中,造成线路建设费用与线损的增加. 因此在实

表 9 不同 k 值下网架规划结果
Tab. 9 Grid planning results at different k values

k 值	网架方案	规划成本/元
0	(1),(2),(3),(4),(9), (15),(16),(19),(20)	13 589 890.90
0.1	(2),(4),(5),(9), (11),(14),(15),(18),(19)	13 608 592.67
0.3	(1),(7),(8),(10),(12), (14),(15),(16),(19)	13 620 087.42
0.5	(4),(6),(7),(8),(12), (14),(15),(18),(20)	13 626 838.30
1	(4),(6),(7),(8),(14), (15),(18),(19),(20)	13 612 333.02

际规划时,需要根据规划地区的实际条件,相应调整 k 值以协调可靠性与经济性需求。

6 结语

针对现有研究对不同类型、不同组成和不同可靠性需求的微电网规划场景缺少一体化规划方法的不足,提出了一种包含微电网的类型与组成判断、容量规划以及网架规划在内的适应多场景的微电网一体化柔性规划方法.以经济性最优为目标,兼顾环保性与可靠性建立双层规划模型:容量规划中,对并网型微电网独立运行时间约束进行调整,满足微电网对不同可靠程度的需求;网架规划中,调整参数 k 以适应不同的可靠性场景,实现对不同场景下微电网的统一规划.仿真结果表明,所提方法在微电网规划上具有良好的普适性,对于不同可靠性需求的场景可给出多种规划结果供以选择,与其他文献中的优化方法相比具有更强的灵活性,更贴合实际工程应用的需要。

参考文献:

[1] 翟桥柱,周玉洲,李轩,等.非预期性与全场景可行性:应对负荷与可再生能源不确定性的现状、挑战与未来[J].中国电机工程学报,2020,40(20):6418-6433.
ZHAI Qiaozhu, ZHOU Yuzhou, LI Xuan, *et al.* Nonanticipativity and all-scenario-feasibility: State of the art, challenges, and future in dealing with the uncertain load and renewable energy[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2020, 40(20): 6418-6433.

[2] 周保荣,黄廷城,张勇军.计及激励型需求响应的微电网可靠性分析[J].电力系统自动化,2017,41(13):70-78.

ZHOU Baorong, HUANG Tingcheng, ZHANG Yongjun. Reliability analysis on microgrid considering incentive demand response[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2017, 41(13): 70-78.

[3] LIU Z H, YI Y Q, YANG J H, *et al.* Optimal planning and operation of dispatchable active power resources for islanded multi-microgrids under decentralised collaborative dispatch framework[J]. **IET Generation, Transmission & Distribution**, 2020, 14(3): 408-422.

[4] SONG W W, CHEN Y F, ZHANG Y J, *et al.* Bidirectional boost converter for high-power transmission between energy storage battery and DC microgrid[J]. **Electronics Letters**, 2019, 55(7): 402-404.

[5] 卓然群.自治微电网的柔性网架规划方法研究[D].北京:华北电力大学(北京),2018.
ZHUO Ranqun. Research on flexible network planning of autonomy micro grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.

[6] ZHANG G P, WANG W J, MAO L B. An overview of microgrid planning and design method[C]// **2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference**. Chongqing, China: IEEE, : 326-329.

[7] ZHAO W X, XU M, NING N, *et al.* A microgrid capacity optimization method considering carbon emission cost[C]// **2020 IEEE Sustainable Power and Energy Conference**. Chengdu, China: IEEE, : 2219-2224.

[8] 谢鹏,蔡泽祥,刘平,等.考虑多时间尺度不确定性耦合影响的风光储微电网系统储能容量协同优化[J].中国电机工程学报,2019,39(24):7126-7136.
XIE Peng, CAI Zexiang, LIU Ping, *et al.* Cooperative optimization of energy storage capacity for renewable and storage involved microgrids considering multi time scale uncertainty coupling influence[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2019, 39(24): 7126-7136.

[9] 马国龙,蔡泽祥,刘平.考虑电价激励需求响应下多主体微电网电源容量优化[J].电力自动化设备,2019,39(5):96-102.
MA Guolong, CAI Zexiang, LIU Ping. Power capacity optimization of microgrid with multiple subjects considering price incentive demand response[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2019, 39(5): 96-102.

[10] 李宏仲,吕梦琳,胡列翔,等.考虑广义储能的微电网联合规划[J].电力自动化设备,2020,40(7):149-160.
LI Hongzhong, LÜ Menglin, HU Liexiang, *et al.*

Joint planning of microgrid considering generalized energy storage[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2020, 40(7): 149-160.

[11] WANG T J, YANG X H. Optimal network planning of AC/DC hybrid microgrid based on clustering and multi-agent reinforcement learning[J]. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, 2021, 13 (2): 025501.

[12] 李楠, 邹晓松, 孙志勇, 等. 基于改进 Dijkstra 算法的配电网网架扩展规划[J]. **电力科学与工程**, 2020, 36(4): 38-43.

LI Nan, ZOU Xiaosong, SUN Zhiyong, *et al.* Distribution network grid expansion planning based on improved dijkstra algorithm[J]. **Electric Power Science and Engineering**, 2020, 36(4): 38-43.

[13] CHE L, ZHANG X P, SHAHIDEHPOUR M, *et al.* Optimal interconnection planning of community microgrids with renewable energy sources[J]. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2017, 8(3): 1054-1063.

[14] 刘健, 杨文字, 余健明, 宋蒙. 一种基于改进最小生成树算法的配电网架优化规划[J]. **中国电机工程学报**, 2004, 24(10): 103-108.

LIU Jian, YANG Wenyu, YU Jianming, *et al.* An improved minmum-cost spanning tree based optimal planning of distribution networks[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2004, 24(10): 103-108.

[15] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 国家能源局. 推进并网型微电网建设试行办法[EB/OL]. (2020-09-17)[2021-06-21]. <https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztl/gbmjcbzc/nyj/201802/P020191205541937174929.pdf>.

National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Pilot method for promoting grid-connected microgrid construction[EB/OL]. (2020-09-17)[2021-06-21]. <https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztl/gbmjcbzc/nyj/201802/P020191205541937174929.pdf>.

(本文编辑:孙伟)