

考虑阶梯碳交易和需求响应的含氢储能的 并网型微电网优化配置

肖 白,刘健康,张 博,武方泽
(东北电力大学 电气工程学院,吉林 吉林 132012)

摘要:针对低碳背景下并网型微电网的优化配置问题,提出了一种考虑阶梯碳交易和需求响应的含氢储能的并网型微电网优化配置方法。通过在规划模型中引入阶梯碳交易机制,降低微电网的碳排放;以可再生能源发电功率与负荷功率的差值绝对值之和最小为目标,利用负荷需求响应引导用户改变用能策略,促进可再生能源消纳,减少储能配置容量,进一步降低微电网的碳排放和经济成本;建立包含风力发电机、光伏阵列、柴油发电机、电解槽、储氢罐、燃料电池的并网型微电网的双层优化配置模型,上层模型以微电网等年值综合成本最小为优化目标,下层模型以微电网年运行成本和年碳交易成本之和最小为优化目标;采用遗传算法与混合整数线性规划相结合的方法对双层优化配置模型进行求解。算例结果验证了所建模型的合理性和有效性,能够为含氢储能的并网型微电网的容量配置提供参考。

关键词:并网型微电网;阶梯碳交易;需求响应;氢储能;双层优化;优化配置

中图分类号:TM 715;TK 01;TK 91

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202204074

0 引言

我国的碳达峰和碳中和战略目标加速推动了能源改革,大力发展可再生能源发电是必经之路^[1]。依托可再生能源、储能等技术构建微电网^[2],通过碳交易、需求响应等机制引导电力行业节能减排,被公认为促进可持续发展的重要举措。合理配置微电网中各设备的容量是保障其发挥良好运营效能的前提,所以在微电网容量配置过程中引入碳交易机制和需求响应的研究具有重大意义。

近年来,国内外学者已经针对微电网的容量优化配置问题进行了多方面的研究:文献[3]针对独立型微电网内多种分布式电源协调运行和控制复杂的问题,提出了基于不同控制策略的独立型风光柴储微电网容量配置方法;文献[4]分析了不同补贴方式对多种电源组合情况下独立微电网容量配置的影响,并对微电网进行了多阶段规划;文献[5]针对孤岛光储微电网的可靠性与经济性相互矛盾的问题,提出了一种兼顾二者的容量配置方法,实现了可靠性与经济性的最优折中;针对并网型微电网,文献[6]提出了一种综合考虑经济性、鲁棒性与自治能力的并网型微电网优化配置方法,并对微电网的并网性能进行了评估分析。

分析上述文献可知,目前微电网中的储能大多以蓄电池为主,但随着储氢技术的日渐成熟,氢储能的应用越来越广泛。文献[7]基于快速估计方法,考虑含氢储能系统的微电网中电、氢储能系统的响应时间不同,根据实际天气、负载情况对微电网系统进行容量优化配置。文献[8]建立了含电氢混合储能的微电网容量配置模型,以单位电量成本、能量过剩率和负载失电率为目标函数,综合考虑了系统的经济性与可靠性,但是只考虑了单一直流负荷且研究对象为光储微电网。文献[9]针对风电场的出力不确定性对氢储能系统热能供需平衡的影响,提出了考虑热平衡的风-氢混合系统中氢储能的容量配置方法,采用分布式鲁棒方法对风电不确定性进行建模。文献[10]考虑到氢储能电热气联供的优点,构建了氢储能多能联储联供模型以及园区综合能源系统的氢储能优化配置模型。

上述研究大多以提高微电网的经济性为目标,然而在低碳电力的要求下,碳排放问题则显得尤为重要。在当前碳交易市场的引导作用下,碳交易机制被认为是最有效的碳减排措施之一^[11]。文献[12]以能源中心为基础,建立了计及碳交易成本的多区域综合能源系统的分散调度模型。文献[13]计及电热可转移负荷的不确定性,构建了基于奖惩阶梯型碳交易机制的综合能源系统规划模型。文献[14]将多阶段规划方法应用于园区综合能源系统规划,建立了一种基于阶梯碳交易的园区综合能源系统多阶段规划模型。然而目前的研究大多将碳交易机制引入综合能源系统的规划与运行中,在微电网容量配置中较少涉及。

收稿日期:2021-11-24;修回日期:2022-02-24

在线出版日期:2022-04-25

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0902205);吉林省产业创新专项基金资助项目(2019C058-7)

Project supported by the National Key R&D Program of China (2017YFB0902205) and the Industrial Innovation Foundation of Jilin Province(2019C058-7)

此外,对于含高渗透可再生能源发电的微电网而言,仅靠发电侧维持系统供电平衡的经济性较差,通过需求响应使用户的用能策略与可再生能源出力在时序上更加一致,成为应对新能源出力不确定性和促进新能源消纳的有效方式。文献[15]在光伏并网型微电网的优化配置中引入需求响应,改善了大规模分布式光伏并网对系统的影响,提升了光伏发电的消纳率,减少了储能的容量配置,提高了微电网的经济性。文献[16]根据风光出力与负荷需求之间的关系,提出了一种动态分时电价机制,基于替代弹性建立了价格型需求响应,减少了柴油发电机的使用,提高了可再生能源的配置容量。

基于以上分析可发现,目前关于微电网优化配置的研究大多只考虑了碳交易或需求响应,在同时考虑碳交易和需求响应方面相对薄弱。然而,在微电网的优化配置过程中同时考虑碳交易和需求响应,有利于实现低碳性与经济性的最优折中。碳交易的引入会改变传统以经济为主的规划模式,可充分考虑系统的低碳性;在碳交易的基础上引入需求响应,一方面可以提高用户对可再生能源的利用率,另一方面可以减少储能装置的配置容量,提高系统的经济性。

本文在已有研究的基础上,提出了一种考虑阶梯碳交易和需求响应的含氢储能的并网型微电网优化配置模型。首先,引入碳交易机制,构建阶梯碳交易成本的计算模型;其次,根据可再生能源与负荷之间的供需关系,以可再生能源发电功率与负荷功率的差值绝对值之和最小为目标,建立激励型需求响应模型;然后,以微电网等年值投资维护成本、年运行成本和年碳交易成本之和最小为目标,建立考虑阶梯碳交易和需求响应的含氢储能并网型微电网规划与运行相结合的双层优化配置模型,对微电网内的设备进行最优配置;最后,通过算例验证所提模型的合理性与有效性。

1 并网型微电网建模

1.1 并网型微电网的结构

本文研究的并网型微电网的结构如图1所示,主要包括光伏阵列、风力发电机、柴油发电机、氢储能系统(由电解槽、储氢罐、燃料电池组成)以及用户负荷。光伏阵列、风力发电机、氢储能系统分别通过各自的变流器或逆变器接入交流微电网。根据用户的用电情况,用户负荷分为可时移负荷、固定负荷。

1.2 微电网中主要设备的模型

并网型微电网中风力发电机、光伏阵列和柴油发电机的数学模型可参考文献[17],本文不再赘述。

氢储能系统与蓄电池等其他储能设备的储能作用相同。当风光输出功率大于负荷需求时,利用电

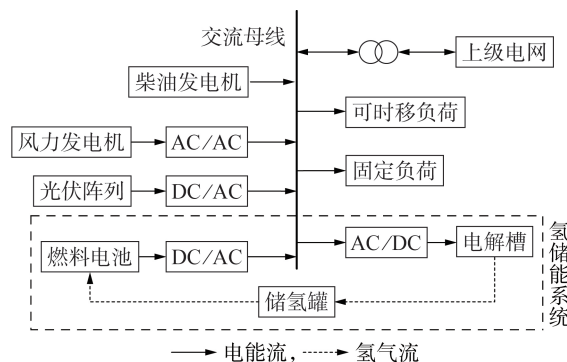


图1 并网型微电网的结构

Fig.1 Structure of grid-connected microgrid

解槽消耗富余的电能,通过电解水来产生氢气,并将氢气储存于储氢罐内,相当于增加了电负荷,提高了可再生能源的消纳水平;当风光输出功率小于负荷需求时,燃料电池以氢气和氧气为原料发生化学反应产生电能以满足负荷需求,提高了系统的可靠性,该过程为电解水的逆过程。本文建立的电解槽、储氢罐、燃料电池的数学模型如下。

1) 电解槽的数学模型。

电解水制氢常用的电解槽主要包括质子交换膜电解槽、固定氧化物电解槽、碱性水电解槽3类^[18]。通常采用碱性水电解槽将水电解产生氢气和氧气,其在 t 时刻的输出功率 $P_{el-out}(t)$ 可表示为:

$$P_{el-out}(t) = \eta_{el} P_{el-in}(t) \quad (1)$$

式中: η_{el} 为电解槽的效率; $P_{el-in}(t)$ 为 t 时刻电解槽的输入功率。

电解槽的最大输入功率除了与其额定容量有关外,还受储氢罐剩余储氢容量的影响。 t 时刻电解槽的最大输入功率 $P_{el-in,max}(t)$ 可表示为:

$$P_{el-in,max}(t) = \min \left\{ P_{el,N}, \frac{E_{ht,max} - E_{ht}(t)}{\Delta t \eta_{el}} \right\} \quad (2)$$

$$E_{ht,max} = S_{SOC,ht,max} E_{ht,N} \quad (3)$$

式中: $P_{el,N}$ 为电解槽的额定容量; $E_{ht,max}$ 为储氢罐的最大储能容量; $E_{ht}(t)$ 为 t 时刻储氢罐储存的能量; $E_{ht,N}$ 为储氢罐的额定容量;类比于蓄电池的荷电状态,本文定义储氢罐的荷电状态为 $S_{SOC,ht}$, $S_{SOC,ht,max}$ 为储氢罐的最大荷电状态; Δt 为时间间隔。

2) 燃料电池的数学模型。

燃料电池通常采用质子交换膜燃料电池,通过燃烧氢气和氧气释放能量,其在 t 时刻的输出功率 $P_{fc-out}(t)$ 可表示为:

$$P_{fc-out}(t) = \eta_{fc} P_{fc-in}(t) \quad (4)$$

式中: η_{fc} 为燃料电池的工作效率; $P_{fc-in}(t)$ 为 t 时刻燃料电池的输入功率,即储氢罐的输出功率。

与电解槽的最大输出功率类似,燃料电池在 t 时刻的最大输出功率 $P_{fc-out,max}(t)$ 受其额定容量以及储

氢罐剩余容量的限制,可表示为:

$$P_{fc-out,max}(t) = \min \left\{ P_{fc,N}, \frac{E_{ht}(t) - E_{ht,min}}{\Delta t} \eta_{fc} \right\} \quad (5)$$

$$E_{ht,min} = S_{SOC,ht,min} E_{ht,N} \quad (6)$$

式中: $P_{fc,N}$ 为燃料电池的额定容量; $E_{ht,min}$ 为储氢罐的最小储能容量; $S_{SOC,ht,min}$ 为储氢罐的最小荷电状态。

3) 储氢罐的数学模型。

储氢罐除了可以存储电解槽产生的氢气外,还可以为燃料电池提供氢气。储氢罐的数学模型如式(7)和式(8)所示。

当储氢罐储氢时,有:

$$E_{ht}(t) = E_{ht}(t-1) + P_{el-in}(t-1) \eta_{el} \Delta t \quad (7)$$

当储氢罐放氢时,有:

$$E_{ht}(t) = E_{ht}(t-1) - \frac{P_{fc-out}(t-1)}{\eta_{fc} \eta_{ht}} \Delta t \quad (8)$$

式中: η_{ht} 为储氢罐的工作效率。

为了分析方便,本文将氢储能系统的单位统一用功率或能量的单位进行描述。经换算可知,一个标准大气压下且温度为 0 °C 时, 1 m³ 氢气的能量约为 2.95 kW·h。

2 碳交易机制模型

碳交易实质上是通过对买卖碳排放配额来实现碳减排的一种交易机制。政府或相关部门通过有偿或无偿的方式将一定的碳排放额分配给具有碳排放的发电企业,当发电企业的实际碳排放量小于政府分配的配额时,可以出售多余的配额,从而获得收益;当发电企业的实际碳排放量大于政府分配的配额时,发电企业必须购买碳排放配额来补偿超出的碳排放量。

2.1 碳交易配额模型

我国的碳交易市场仍处于初期阶段,碳排放配额往往免费分配给参与碳交易机制的发电企业。本文采用碳排放配额与发电量成比例的分配方法,各发电企业的碳排放配额不同。根据图 1 所示并网型微电网,认为微电网的碳排放主要来源于柴油发电机和从上级电网购买的火电,因此碳交易的无偿碳排放配额 D_G 可表示为:

$$D_G = \alpha_{de} \sum_{t=1}^T P_{de}(t) \Delta t + \alpha_{grid, gf} \sum_{t=1}^T \delta_{grid, gf} P_{grid, buy}(t) \Delta t \quad (9)$$

式中: α_{de} 为柴油发电机的单位电量碳排放配额; $\alpha_{grid, gf}$ 为从上级电网购买火电的单位电量碳排放配额; $P_{de}(t)$ 为 t 时刻柴油发电机的输出功率; $P_{grid, buy}(t)$ 为 t 时刻微电网从上级电网购买的功率; $\delta_{grid, gf}$ 为从上级电网购买电量中火电的占比系数; T 为碳交易费用的结算周期。

2.2 阶梯碳交易成本的计算模型

阶梯碳交易是将碳排放量分为若干个区间,碳

排放量越多的区间,碳交易价格越高,碳交易成本越大。阶梯碳交易成本的计算模型为:

$$F_{CO_2} = \begin{cases} c_{CO_2}(E_G - D_G) & E_G \leq D_G + L \\ c_{CO_2}(1+\lambda)(E_G - D_G - L) + c_{CO_2}L & D_G + L \leq E_G \leq D_G + 2L \\ c_{CO_2}(1+2\lambda)(E_G - D_G - 2L) + c_{CO_2}(2+\lambda)L & D_G + 2L \leq E_G \leq D_G + 3L \\ c_{CO_2}(1+3\lambda)(E_G - D_G - 3L) + c_{CO_2}(3+3\lambda)L & D_G + 3L \leq E_G \leq D_G + 4L \\ c_{CO_2}(1+4\lambda)(E_G - D_G - 4L) + c_{CO_2}(4+6\lambda)L & E_G \geq D_G + 4L \end{cases} \quad (10)$$

$$E_G = \beta_{de} \sum_{t=1}^T P_{de}(t) \Delta t + \beta_{grid, gf} \sum_{t=1}^T \delta_{grid, gf} P_{grid, buy}(t) \Delta t \quad (11)$$

式中: F_{CO_2} 为碳交易成本,为正值时表示系统需要购买碳排放权,为负值时表示系统可以出售碳排放权以获利; c_{CO_2} 为碳交易价格; E_G 为系统的碳排放量; L 为碳排放量的区间长度; λ 为碳交易价格的增长幅度; β_{de} 为柴油发电机单位电量的碳排放强度; $\beta_{grid, gf}$ 为从上级电网购买单位电量火电的碳排放强度。

3 需求响应模型

需求响应是负荷参与电力调整的一种机制。本文采用激励型需求响应,通过调整可时移负荷的用电时间,使得调度周期内的负荷曲线与风光出力曲线在时序上尽可能一致,以促进可再生能源消纳。

3.1 目标函数

本文采用的需求响应优化目标为调度周期内各时刻的可再生能源发电功率与负荷功率的差值绝对值之和最小,如式(12)所示。

$$\begin{cases} \min \sum_{t=1}^{24} |P_{pv}(t) + P_{wt}(t) - P_{load, after}(t)| \Delta t \\ P_{load, after}(t) = P_{load, before}(t) + \Delta P_{load}(t) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_{pv}(t)$ 、 $P_{wt}(t)$ 分别为 t 时刻光伏阵列、风力发电机的输出功率; $P_{load, before}(t)$ 、 $P_{load, after}(t)$ 分别为需求响应前、后 t 时刻的负荷功率; $\Delta P_{load}(t)$ 为 t 时刻的负荷转移量,其值大于 0 表示转入负荷,其值小于 0 表示转出负荷。

3.2 约束条件

1) 负荷转移时段约束。

负荷只能在同一个调度周期内转入或转出,即转移时段应满足:

$$t^* \in T_n, t' \in T_n \quad (13)$$

式中: t^* 为负荷转入时段; t' 为负荷转出时段; T_n 为第 n 个调度周期。

2) 负荷转移量约束。

负荷转移量应满足一个调度周期内需求响应

前、后总负荷需求不变,且各时刻的负荷转移量应不超过最大负荷转移量,如式(14)所示。

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^{24} \Delta P_{\text{load}}(t) \Delta t = 0 \\ -\Delta P_{\text{load, max}}(t) \leq \Delta P_{\text{load}}(t) \leq \Delta P_{\text{load, max}}(t) \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\Delta P_{\text{load, max}}(t)$ 为 t 时刻的最大负荷转移量。

4 微电网双层优化配置模型及其求解算法

为了在微电网规划时计及其实际运行策略,使规划与运行紧密联系,本文构建了计及微电网规划与运行的双层优化配置模型,主要包含2个优化任务:①上层优化为容量配置优化,以微电网等年值综合成本最小为目标;②下层优化为系统运行优化,以微电网年运行成本与年碳交易成本之和最小为目标。将上层容量配置优化结果传递给下层,下层根据已知的设备容量将求解的最优运行结果传递给上层,上下层交替迭代,得到最优配置结果。

4.1 上层优化模型

由图1所示微电网结构可知,上层优化的决策变量为风力发电机、光伏阵列、柴油发电机、电解槽、储氢罐、燃料电池的配置容量。

4.1.1 目标函数

微电网的等年值综合成本包括等年值投资成本、年维护成本、年运行成本和年碳交易成本。上层优化模型可表示为:

$$\min F = F_{\text{inv}} + F_{\text{main}} + F_{\text{om}} + F_{\text{CO}_2} \quad (15)$$

式中: F 为等年值综合成本; F_{inv} 为等年值投资成本; F_{main} 为年维护成本; F_{om} 为年运行成本。

等年值投资成本 F_{inv} 的计算式为:

$$F_{\text{inv}} = \sum_{k \in \Omega_k} C_k P_{k, N} r^{\text{CR}} + C_{\text{ht}} E_{\text{ht, N}} r^{\text{CR}} \quad (16)$$

$$r^{\text{CR}} = \frac{\gamma(1+\gamma)^{y_k}}{(1+\gamma)^{y_k} - 1} \quad (17)$$

式中: Ω_k 为投建设备集合,包括光伏阵列、风力发电机、柴油发电机、电解槽、燃料电池; C_k 为设备 k 的单位功率投资成本; C_{ht} 为储氢罐的单位容量投资成本; $P_{k, N}$ 为设备 k 的装机容量; r^{CR} 为资金收回系数; γ 为贴现率,取值为0.05; y_k 为设备 k 的运行年限。

年维护成本 F_{main} 的计算式为:

$$F_{\text{main}} = \sum_{k \in \Omega_k} C_{\text{main, k}} P_{k, N} + C_{\text{main, ht}} E_{\text{ht, N}} \quad (18)$$

式中: $C_{\text{main, k}}$ 为设备 k 的单位功率年维护成本; $C_{\text{main, ht}}$ 为储氢罐的单位容量年维护成本。

年运行成本和年碳交易成本的数学模型见下层优化模型。

4.1.2 约束条件

受场地、经济等因素的影响,各设备的额定容量

应满足式(19)所示约束。

$$\begin{cases} P_{\text{pv, N}}^{\min} \leq P_{\text{pv, N}} \leq P_{\text{pv, N}}^{\max} \\ P_{\text{wt, N}}^{\min} \leq P_{\text{wt, N}} \leq P_{\text{wt, N}}^{\max} \\ P_{\text{de, N}}^{\min} \leq P_{\text{de, N}} \leq P_{\text{de, N}}^{\max} \\ P_{\text{el, N}}^{\min} \leq P_{\text{el, N}} \leq P_{\text{el, N}}^{\max} \\ E_{\text{ht, N}}^{\min} \leq E_{\text{ht, N}} \leq E_{\text{ht, N}}^{\max} \\ P_{\text{fc, N}}^{\min} \leq P_{\text{fc, N}} \leq P_{\text{fc, N}}^{\max} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $P_{\text{pv, N}}$ 、 $P_{\text{wt, N}}$ 、 $P_{\text{de, N}}$ 分别为光伏阵列、风力发电机、柴油发电机的额定装机容量;上标 max、min 分别表示相应变量的最大值、最小值。

4.2 下层优化模型

下层优化模型是根据上层优化模型确定的各设备的装机容量,合理分配系统内各分布式电源和储能设备的出力。此外,并网型微电网还会与上级电网进行功率交互。因此,下层优化模型的决策变量为一年内各时刻光伏阵列、风力发电机、柴油发电机的供电功率,氢储能系统的充放电功率以及与上级电网的购售电功率。

4.2.1 目标函数

下层优化模型以年运行成本和年碳交易成本之和最小为目标,如式(20)所示,其中年运行成本 F_{om} 包括燃料成本、需求响应补偿成本、微电网与上级电网的购售电成本,考虑到可再生能源消纳问题,在运行成本中加入了弃风和弃光惩罚成本。

$$\begin{cases} \min F_1 = F_{\text{om}} + F_{\text{CO}_2} \\ F_{\text{om}} = F_{\text{fuel}} + F_{\text{dr}} + F_{\text{grid}} + F_{\text{waste}} \\ F_{\text{fuel}} = C_{\text{fuel}} \left[\sum_{d \in \Omega_D} \sum_{t=1}^{24} N_D^d (a P_{\text{de}}^d(t) + b P_{\text{de, N}}) \right] \\ F_{\text{dr}} = C_{\text{dr}} \sum_{d \in \Omega_D} \sum_{t=1}^{24} N_D^d \Delta P_{\text{load}}^d(t) \Delta t \\ F_{\text{grid}} = \sum_{d \in \Omega_D} \sum_{t=1}^{24} N_D^d (C_{\text{grid, buy}}(t) P_{\text{grid, buy}}^d(t) \Delta t - C_{\text{grid, sell}}(t) P_{\text{grid, sell}}^d(t) \Delta t) \\ F_{\text{waste}} = \sum_{d \in \Omega_D} \sum_{t=1}^{24} N_D^d (C_{\text{waste, wt}} P_{\text{waste, wt}}^d(t) \Delta t + C_{\text{waste, pv}} P_{\text{waste, pv}}^d(t) \Delta t) \\ \begin{cases} P_{\text{waste, wt}}^d(t) = P_{\text{wt0}}^d(t) - P_{\text{wt}}^d(t) \\ P_{\text{waste, pv}}^d(t) = P_{\text{pv0}}^d(t) - P_{\text{pv}}^d(t) \end{cases} \end{cases} \quad (20)$$

式中: F_1 为下层优化目标值; F_{fuel} 为年燃料成本,只考虑柴油发电机的燃油消耗; F_{dr} 为用户参与需求响应的年负荷转移补偿成本; F_{grid} 为微电网与上级电网的购售电成本; F_{waste} 为年弃风和弃光惩罚成本; Ω_D 为典型日集合,包括夏、冬、春秋3个典型日; N_D^d 为典型日 d 在一年中所占的天数; C_{fuel} 为柴油单价; $P_{\text{de}}^d(t)$ 为柴油发电机在典型日 d 内 t 时刻的发电功率; a 、 b

分别为油耗-功率曲线的斜率、截距系数; C_{dr} 为单位电量负荷的转移补偿成本; $C_{grid, buy}(t)$ 、 $C_{grid, sell}(t)$ 分别为 t 时刻微电网的购电、售电电价; $P_{grid, buy}^d(t)$ 、 $P_{grid, sell}^d(t)$ 分别为典型日 d 内 t 时刻微电网的购电、售电功率; $C_{waste, wt}$ 、 $C_{waste, pv}$ 分别为单位弃风、弃光电量的惩罚费用; $P_{waste, wt}^d(t)$ 、 $P_{waste, pv}^d(t)$ 分别为典型日 d 内 t 时刻的弃风、弃光功率; $P_{pv0}^d(t)$ 、 $P_{wt0}^d(t)$ 分别为典型日 d 内 t 时刻光伏阵列、风力发电机的可发电功率; $P_{pv}^d(t)$ 、 $P_{wt}^d(t)$ 分别为典型日 d 内 t 时刻光伏阵列、风力发电机的实际输出功率。

4.2.2 约束条件

1) 功率平衡约束。

用户负荷功率应满足式(22)所示等式约束。

$$P_{pv}^d(t) + P_{wt}^d(t) + P_{de}^d(t) + P_{fc-out}^d(t) + P_{grid, buy}^d(t) = P_{load}^d(t) + P_{el-in}^d(t) + P_{grid, sell}^d(t) \quad (22)$$

式中: $P_{load}^d(t)$ 为典型日 d 内 t 时刻的负荷功率; $P_{fc-out}^d(t)$ 为典型日 d 内 t 时刻燃料电池的输出功率; $P_{el-in}^d(t)$ 为典型日 d 内 t 时刻电解槽的输入功率。

2) 分布式电源出力约束。

光伏阵列、风力发电机、柴油发电机的发电功率应满足式(23)所示不等式约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{pv0}^d(t) \leq P_{pv, N} \\ 0 \leq P_{wt0}^d(t) \leq P_{wt, N} \\ 0 \leq P_{de}^d(t) \leq P_{de, N} \end{cases} \quad (23)$$

3) 氢储能系统约束。

氢储能中电解槽、燃料电池的功率约束分别见式(24)和式(25), 储氢罐的储能容量、荷电状态约束分别见式(26)和式(27)。为了保障氢储能系统能够连续有效地工作, 应保证调度周期始、末时刻储氢罐的荷电状态相等, 见式(28)。

$$0 \leq P_{el-in}^d(t) \leq P_{el-in, max}^d(t) \quad (24)$$

$$0 \leq P_{fc-out}^d(t) \leq P_{fc-out, max}^d(t) \quad (25)$$

$$E_{ht, min} \leq E_{ht}^d(t) \leq E_{ht, max} \quad (26)$$

$$S_{SOC, ht, min} \leq S_{SOC, ht}^d(t) \leq S_{SOC, ht, max} \quad (27)$$

$$S_{SOC, ht}^d(t_0) = S_{SOC, ht}^d(t_N) \quad (28)$$

式中: $S_{SOC, ht}^d(t)$ 为典型日 d 内 t 时刻储氢罐的荷电状态; t_0 、 t_N 分别为调度周期的始、末时刻; $S_{SOC, ht}^d(t_0)$ 和 $S_{SOC, ht}^d(t_N)$ 分别为典型日 d 内调度周期始、末储氢罐的荷电状态。

4) 交换功率约束。

并网型微电网与上级电网相连接, 能够进行购电, 但由于线路功率存在限制, 且过大的售电功率会对上级电网造成影响, 因此微电网的购电、售电功率应满足式(29)所示不等式约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{grid, buy}^d(t) \leq P_{grid, buy, max}^d \\ 0 \leq P_{grid, sell}^d(t) \leq P_{grid, sell, max}^d \end{cases} \quad (29)$$

式中: $P_{grid, buy, max}^d$ 、 $P_{grid, sell, max}^d$ 分别为典型日 d 微电网从上级

级电网购电、向上级电网售电的最大功率限值。

5) 弃风、弃光功率约束。

为了保障可再生能源的利用率, 微电网的弃风、弃光功率应分别满足式(30)和式(31)所示不等式约束。

$$0 \leq \frac{\sum_{d \in \Omega_D} \sum_{t=1}^{24} P_{waste, wt}^d(t) \Delta t}{\sum_{d \in \Omega_D} \sum_{t=1}^{24} P_{wt0}^d(t) \Delta t} \leq a_{waste, wt} \quad (30)$$

$$0 \leq \frac{\sum_{d \in \Omega_D} \sum_{t=1}^{24} P_{waste, pv}^d(t) \Delta t}{\sum_{d \in \Omega_D} \sum_{t=1}^{24} P_{pv0}^d(t) \Delta t} \leq a_{waste, pv} \quad (31)$$

式中: $a_{waste, wt}$ 、 $a_{waste, pv}$ 分别为最大弃风率、最大弃光率。

4.3 双层优化配置模型的求解算法

采用遗传算法对上层优化模型进行求解, 因为上层为容量配置优化, 决策变量较少, 遗传算法中的染色体可以更方便地对设备类型和数量进行编码。通过调用 CPLEX 求解器采用混合整数线性规划方法求解下层优化模型, 因为下层为运行优化问题, 属于多约束线性模型, 决策变量较多, CPLEX 求解器适用于处理多约束问题, 可以使求解更加简便和准确。双层优化配置模型的求解流程图如图 2 所示, 具体求解步骤见附录 A。

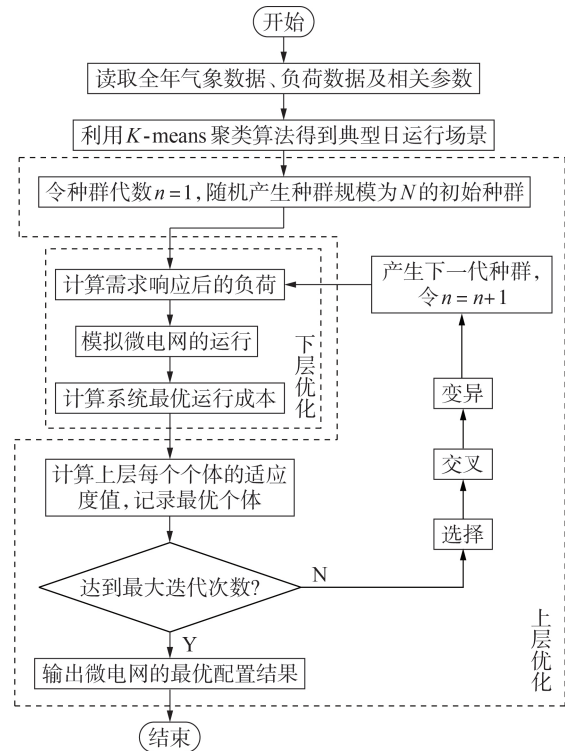


图 2 双层优化配置模型的求解流程图

Fig.2 Flowchart of solving two-layer optimal configuration model

5 算例分析

5.1 基础数据

为了验证本文所建模型的正确性,以某地区微电网为例进行优化配置。该地区的年风速曲线、年光照强度曲线和年负荷曲线分别见附录B图B1—B3。利用K-means聚类算法得到夏、冬、春秋典型日的风速、光照强度和负荷曲线,分别见附录B图B4—B6。根据上述优化配置模型,微电网内的备选设备为风力发电机、光伏阵列、柴油发电机、电解槽、燃料电池、储氢罐,相关成本参数参考文献[10-17],具体参数取值如附录B表B1所示。微电网的购电、售电电价分别为0.49、0.38元/(kW·h),碳交易价格为0.2676元/kg,外购电力的无偿碳排放配额为0.789 kg/(kW·h),柴油发电机发电的无偿碳排放配额为0.500 kg/(kW·h),外购单位电量的碳排放强度为0.920 kg/(kW·h),柴油发电机的单位电量碳排放强度为0.649 kg/(kW·h),柴油单价为6.13元/L,用户参与需求响应时每转移1 kW·h负荷补偿0.4元,单位弃风、弃光电量惩罚费用均为0.6元/(kW·h),最大弃风率、最大弃光率均为10%,外购电力中火电占比系数为100%。

5.2 方案对比分析

设置5种方案对碳交易和需求响应参与微电网运行及优化配置进行分析:①方案1,不考虑碳交易和需求响应;②方案2,考虑常规碳交易,但不考虑需求响应;③方案3,考虑阶梯碳交易,但不考虑需求响应;④方案4,考虑常规碳交易和需求响应;⑤方案5,考虑阶梯碳交易和需求响应(本文模型)。

5种方案下微电网的容量配置结果及各项成本分别见表1和表2。

表1 5种方案的容量配置结果

Table 1 Capacity configuration results of five schemes

方案	配置容量					
	风力发电机 / kW	光伏阵列 / kW	柴油发电机 / kW	电解槽 / kW	燃料电池 / kW	储氢罐 / (kW·h)
1	1375	1904	300	425	473	3875
2	1450	2159	120	472	331	4000
3	1575	2250	40	500	374	5500
4	1450	2159	120	194	210	3095
5	1575	2250	40	210	238	3100

表2 5种方案的成本计算结果

Table 2 Cost calculation results of five schemes

方案	投资和维护成本 / 万元	燃料成本 / 万元	需求响应补偿成本 / 万元	购售电成本 / 万元	弃风和弃光惩罚成本 / 万元	碳交易成本 / 万元	总成本 / 万元	购电量 / (MW·h)	售电量 / (MW·h)	碳排放量 / t
1	333.00	9.74	0	67.24	0	0	409.98	1687.8	406.8	1614.9
2	346.03	8.77	0	46.52	8.95	5.20	415.48	1415.5	601.0	1340.0
3	372.33	1.12	0	28.34	13.77	8.09	423.64	1162.4	753.1	1074.2
4	323.26	8.27	8.65	40.76	11.51	4.70	397.15	1277.5	574.8	1210.9
5	343.72	1.09	8.72	28.29	26.76	7.59	416.17	1090.9	662.3	1009.0

5.2.1 不同碳交易成本计算模型对微电网规划与运行的影响分析

1) 方案1与方案2的对比分析。

由表1和表2可知:相较于方案1,方案2下风力发电机和光伏阵列的配置容量分别增大了75、255 kW,柴油发电机的配置容量减小了180 kW,微电网的投资成本和碳交易成本都有所增加,而碳排放量大幅降低,方案2的总成本增加了5.5万元,但是由于购电量和柴油发电机的发电量减少,微电网的碳排放量降低了274.9 t。

可见,碳交易的碳减排机制是通过将高碳排机组的碳排放量转化为对应机组的碳排放成本,间接地提高高碳排机组的发电成本,从而使风力发电机和光伏阵列的发电成本相对减少,使得风力发电机和光伏阵列的投建容量显著增大。

2) 方案2与方案3以及方案4与方案5的对比分析。

相较于方案2,由于方案3考虑了阶梯碳交易,其风力发电机和光伏阵列的配置容量进一步增大,柴油发电机的配置容量再次减小。另外,随着风力发电机和光伏阵列容量的增大,弃风、弃光也会增多,为了保证可再生能源的利用率,电解槽和储氢罐的配置容量会随着风力发电机和光伏阵列配置容量的增大而增大。相较于方案2,方案3的总成本增加了1.96%,碳排放量减少了19.84%。相较于方案4,方案5考虑了阶梯碳交易,总成本增加了4.79%,碳排放量减少了16.67%。这表明阶梯碳交易在减少碳排放方面更有效性,在碳交易机制的影响下,微电网的规划与运行偏向于碳排放量小且投资成本高的风电、光伏机组。

综上所述,合理的碳交易机制会增大低碳排、高投资的可再生能源机组的配置容量,减少高碳排、低投资机组的使用,引入碳交易机制虽然会使得微电网的经济不是最优,但是在低碳方面获得的效益远可以弥补经济方面的损失。

5.2.2 需求响应机制对微电网规划与运行的影响分析

1) 方案2与方案4的对比分析。

由表1和表2可知:相较于方案2,方案4在考虑

碳交易的基础上进一步考虑了需求响应,其电解槽、燃料电池、储氢罐的配置容量分别减少了278 kW、121 kW、905 kW·h,微电网的燃料成本减少了0.5万元,购电量减少了138 MW·h,从而使得碳排放量减少了129.1 t。

2)方案3与方案5的对比分析。

由表1和表2可知:相较于方案3,方案5的电解槽、燃料电池、储氢罐的配置容量分别减少了290 kW、136 kW、2 400 kW·h,购电量减少了71.5 MW·h,碳排放量减少了65.2 t。

由上述分析可知,在进行微电网内设备的容量配置时,引入需求响应机制会降低储能的配置容量,获得更好的经济效益,同时也会减少柴油发电机的发电量和从上级电网的购电量,进而减少系统的碳排放量,提高系统的低碳效益。这是因为本文采用的需求响应策略能够使负荷曲线趋势与风光出力曲线趋势更加吻合,使负荷充分利用可再生能源发电,缩减了平抑风光出力波动所需的柴油发电机出力、储能系统出力和外网购电量。另外,引入需求响应后储能容量的减少虽然使可再生能源利用率略有牺牲,但相较于总经济成本、系统碳排放量等指标的改善,该牺牲可以忽略不计。

在5种方案中:从经济水平来看,方案4的总成本最小;从碳排放量来看,方案5的碳排放量最少。相较于方案4,方案5的总成本多19.02万元,增大了4.79%,方案5的碳排放量少201.9 t,减少了16.67%。综合微电网的经济和碳排放来看,方案5的碳排放效益远大于其经济损失,在低碳发展的背景下,方案5为最优配置方案。

根据5种方案的配置结果,统计各发电机组的年发电量和年购电量,如图3所示。由图可知,考虑阶梯碳交易的方案3和方案5下可再生能源发电量较其他3种方案多。相较于方案3,方案5考虑了需求响应,其储能配置容量的减少虽然使微电网的可再生能源利用率有所降低,但是给微电网带来的经

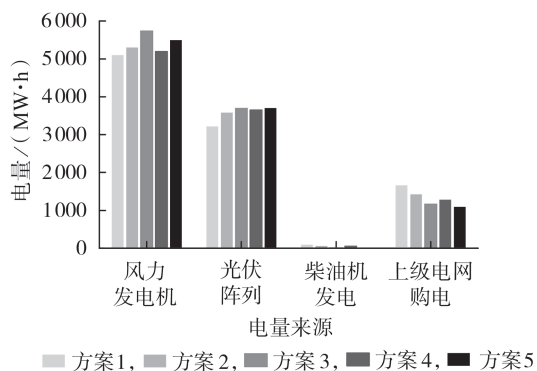


图3 5种方案下各发电机组的年发电量和年购电量
Fig.3 Annual energy output of each generator and annual purchasing energy under five schemes

济效益和环境效益远远大于可再生能源利用率降低带来的损失。

5.3 需求响应负荷特性分析

方案2下实施需求响应前、后冬季以及夏季某典型日的可再生能源发电和负荷变化情况如图4所示。从图中可以看出,负荷从可再生能源出力大的时段转移到了可再生能源出力小的时段,使得负荷曲线和可再生能源出力曲线在时序上更加一致,调度周期内负荷需求功率与可再生能源发电功率之间的差值绝对值变小,从而提升了可再生能源的消纳率。方案5的迭代收敛结果如图5所示。由图可以看出,本文采用的遗传算法可以较快的速度收敛至最优值。

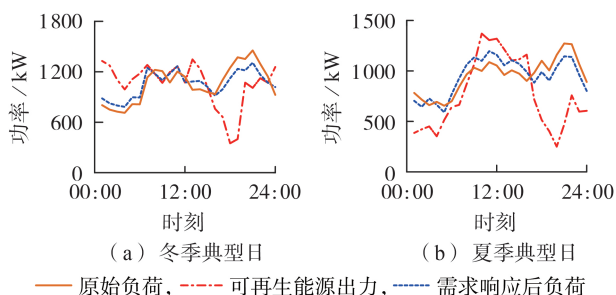


图4 方案2下需求响应前、后负荷的变化情况

Fig.4 Change of load before and after demand response under Scheme 2

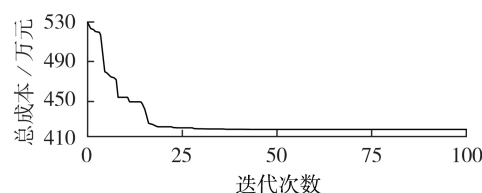


图5 方案5的迭代收敛结果

Fig.5 Iterative convergence result of Scheme 5

5.4 碳交易基准价格对微电网规划结果的影响

基于方案5,不同碳交易基准价格下微电网的规划结果如表3所示。由表可以看出,相较于碳交易基准价格较低的情况,当碳交易基准价格较高时,风力发电机、光伏阵列的配置容量以及系统总成本增大,购电量、碳排放量减少。可见,碳交易基准价格越高,碳排放成本所占比重越大,为了限制系统的碳排放量,规划方案偏向于增大风力发电机、光伏阵列的投建容量,提高可再生能源发电量与外网购电量的比例,从而减少系统的碳排放总量。

6 结论

本文针对低碳背景下并网型微电网的容量配置问题,建立了考虑阶梯碳交易和需求响应的含氢储能的并网型微电网的优化配置模型,通过算例进行

表3 不同碳交易基准价格下微电网的规划结果

Table 3 Planning results of microgrid with different carbon trading benchmark prices

碳交易基准 价格/(元·kg ⁻¹)	配置容量						购电量/ (MW·h)	总成本/ 万元	碳排放 量/t
	风力发电 机/kW	光伏阵 列/kW	柴油发电 机/kW	电解槽/ kW	燃料电池/ kW	储氢罐/ (kW·h)			
0.268	1575	2250	40	210	238	3 100	1 090.9	416.17	1 009.0
0.536	1675	2377	0	650	738	3 500	815.8	477.96	750.6
0.804	1675	2423	0	650	856	4 000	764.2	495.15	703.0
1.072	1675	2627	0	753	1 290	5 000	502.8	547.79	462.6
1.340	1700	2568	0	747	1 310	5 546	487.5	551.48	448.5

仿真验证,可得如下结论:

1)本文所建含氢储能的并网型微电网的优化配置模型通过引入碳交易机制,能够提高可再生能源的配置容量、减少微电网的碳排放,且相较于引入常规碳交易的配置模型,引入阶梯碳交易的配置模型的控碳效果更优;

2)本文所建优化配置模型在碳交易机制的基础上,引入了需求响应,能够实现对负荷侧灵活性资源的充分利用,减少储能的配置容量,提升可再生能源的消纳水平,进一步减少微电网的碳排放和经济成本。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 张运洲,张宁,代红才,等. 中国电力系统低碳发展分析模型构建与转型路径比较[J]. 中国电力,2021,54(3):1-11.
ZHANG Yunzhou,ZHANG Ning,DAI Hongcai,et al. Model construction and pathways of low-carbon transition of China's power system[J]. Electric Power,2021,54(3):1-11.
- [2] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.
YANG Xinfu,SU Jian,LÜ Zhipeng,et al. Overview on microgrid technology[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(1):57-70.
- [3] 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.
- [4] 潘文霞,李建成,方坤豪. 考虑补贴的独立微网容量配置优化方法[J]. 电网技术,2018,42(7):2206-2213.
PAN Wenxia,LI Jiancheng,FANG Kunhao. Optimization method of capacity configuration of standalone microgrid considering subsidy[J]. Power System Technology,2018,42(7):2206-2213.
- [5] 周京华,翁志鹏,宋晓通. 兼顾可靠性与经济性的孤岛型光储微电网容量配置方法[J]. 电力系统自动化,2021,45(8):166-174.
ZHOU Jinghua,WENG Zhipeng,SONG Xiaotong. Capacity configuration method of islanded microgrid with photovoltaic and energy storage system considering reliability and economy[J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(8):166-174.
- [6] 薛美东,赵波,张雪松,等. 并网型微网的优化配置与评估[J]. 电力系统自动化,2015,39(3):6-13.
XUE Meidong,ZHAO Bo,ZHANG Xuesong,et al. Integrated plan and evaluation of grid-connected microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(3):6-13.
- [7] NGUYEN T H T,NAKAYAMA T,ISHIDA M. Optimal capacity design of battery and hydrogen system for the DC grid with photovoltaic power generation based on the rapid estimation of grid dependency[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2017,89:27-39.
- [8] 李奇,赵淑丹,蒲雨辰,等. 考虑电氢耦合的混合储能微电网容量配置优化[J]. 电工技术学报,2021,36(3):486-495.
LI Qi,ZHAO Shudan,PU Yuchen,et al. Capacity optimization of hybrid energy storage microgrid considering electricity-hydrogen coupling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2021,36(3):486-495.
- [9] 司杨,陈来军,陈晓骏,等. 基于分布鲁棒的风-氢混合系统氢储能容量优化配置[J]. 电力自动化设备,2021,41(10):3-10.
SI Yang,CHEN Laijun,CHEN Xiaotao,et al. Optimal capacity allocation of hydrogen energy storage in wind-hydrogen hybrid system based on distributionally robust[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(10):3-10.
- [10] 熊宇峰,陈来军,郑天文,等. 考虑电热气耦合特性的低碳园区综合能源系统氢储能优化配置[J]. 电力自动化设备,2021,41(9):31-38.
XIONG Yufeng,CHEN Laijun,ZHENG Tianwen,et al. Optimal configuration of hydrogen energy storage in low-carbon park integrated energy system considering electricity-heat-gas coupling characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(9):31-38.
- [11] LU Siyu,LOU Suhua,WU Yaowu,et al. Power system economic dispatch under low-carbon economy with carbon capture plants considered[J]. IET Generation,Transmission & Distribution,2013,7(9):991-1001.
- [12] 瞿凯平,黄琳妮,余涛,等. 碳交易机制下多区域综合能源系统的分散调度[J]. 中国电机工程学报,2018,38(3):697-707.
QU Kaiping,HUANG Linni,YU Tao,et al. Decentralized dispatch of multi-area integrated energy systems with carbon trading[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(3):697-707.
- [13] 张晓辉,刘小琰,钟嘉庆. 考虑奖惩阶梯型碳交易和电-热转移负荷不确定性的综合能源系统规划[J]. 中国电机工程学报,2020,40(19):6132-6142.
ZHANG Xiaohui,LIU Xiaoyan,ZHONG Jiaqing. Integrated energy system planning considering a reward and punishment ladder-type carbon trading and electric-thermal transfer load uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(19):6132-6142.
- [14] 陈志,胡志坚,翁菖宏,等. 基于阶梯碳交易机制的园区综合能源系统多阶段规划[J]. 电力自动化设备,2021,41(9):148-155.
CHEN Zhi,HU Zhijian,WENG Changhong,et al. Multi-stage planning of park-level integrated energy system based on ladder-type carbon trading mechanism[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(9):148-155.
- [15] 赵波,包侃侃,徐志成,等. 考虑需求侧响应的光储并网型微电网优化配置[J]. 中国电机工程学报,2015,35(21):5465-5474.

- ZHAO Bo, BAO Kankan, XU Zhicheng, et al. Optimal sizing for grid-connected PV-and-storage microgrid considering demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5465-5474.
- [16] 张有兵,任帅杰,杨晓东,等. 考虑价格型需求响应的独立型微电网优化配置[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 55-62.
- ZHANG Youbing, REN Shuaijie, YANG Xiaodong, et al. Optimal configuration considering price-based demand response for stand-alone microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 55-62.
- [17] 邵志芳,赵强,张玉琼. 独立型微电网源荷协调配置优化[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 3935-3946.
- SHAO Zhifang, ZHAO Qiang, ZHANG Yuqiong. Source side and load side coordinated configuration optimization for stand-alone micro-grid[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3935-3946.
- [18] 蔡国伟,孔令国,薛宇,等. 风氢耦合发电技术研究综述[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(21): 127-135.
- CAI Guowei, KONG Lingguo, XUE Yu, et al. Overview of re-

search on wind power coupled with hydrogen production technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(21): 127-135.

作者简介:



肖 白

肖 白(1973—),男,教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统规划、空间电力负荷预测、多能源互补协调发电、电能质量综合治理等(**E-mail**: xbxiaobai@126.com);

刘健康(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为配电网规划、微电网优化配置(**E-mail**: 2275356577@qq.com);

张 博(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为多种能源互补协调发电(**E-mail**: 599939246@qq.com)。

(编辑 陆丹)

Optimal configuration of grid-connected microgrid with hydrogen energy storage considering ladder-type carbon trading and demand response

XIAO Bai, LIU Jiankang, ZHANG Bo, WU Fangze

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: Aiming at the optimal configuration of grid-connected microgrid under the background of low carbon, an optimal configuration method of grid-connected microgrid with hydrogen energy storage considering ladder-type carbon trading and demand response is proposed. The ladder-type carbon trading mechanism is introduced into the planning model to reduce the carbon emission of microgrid. With the goal of minimizing the absolute sum of the difference between the renewable energy power and the load power, the load demand response is used to guide users to change their energy consumption strategies, promote the absorption of renewable energy, reduce the configuration capacity of energy storage, and further reduce the carbon emission and economic cost of the microgrid. A two-layer optimal configuration model of grid-connected microgrid including wind turbine, photovoltaic array, diesel generator, electrolytic cell, hydrogen storage tank and fuel cell is established. The optimization goal of the upper layer model is to minimize the equal annual comprehensive cost of microgrid, and the optimization goal of the lower layer model is to minimize the sum of the annual operation cost and annual carbon transaction cost of microgrid. The two-layer optimal configuration model is solved by combining genetic algorithm with mixed integer linear programming. The simulative results verify the rationality and effectiveness of the proposed model, which can provide reference for the capacity configuration of grid-connected microgrid containing hydrogen energy storage.

Key words: grid-connected microgrid; ladder-type carbon trading; demand response; hydrogen energy storage; two-layer optimization; optimal configuration

附录 A

1) 读取全年气象数据、年负荷数据及相关参数, 利用 *K-means* 算法对风速、光照和负荷按照夏、冬、春秋季进行聚类, 获得典型场景。

2) 上层模型采用遗传算法随机产生种群, 生成容量配置方案, 并将其传递给下层。

3) 下层模型在已知的设备容量基础上, 计算得到需求响应后的负荷, 并按照此负荷进行微电网运行模拟, 以年运行成本与年碳交易成本之和最小为目标, 采用 *CPLEX* 求解器求得最小运行成本, 得到最优运行方案, 并将其返回给上层模型。

4) 上层模型根据容量配置方案及下层模型的最优运行方案, 以微电网的等年值综合成本最小为目标, 采用遗传算法进行适应度值的计算, 记录保存当前代最优个体, 并采用轮盘赌法和精英保留策略对当前种群进行选择、交叉、变异来产生新种群, 将产生的新种群再次传递给下层优化模型进行优化计算。如此, 上下层模型进行循环迭代, 当达到要求的最大迭代次数后, 停止迭代, 输出最后一代种群中的最优个体, 即微电网最优配置结果。

附录 B

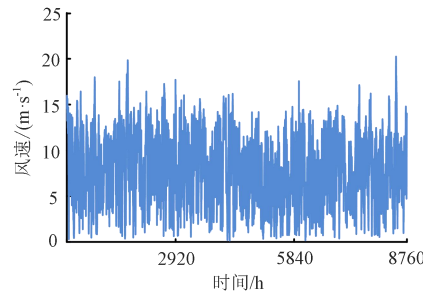


图 B1 年风速曲线

Fig.B1 Annual wind speed curve

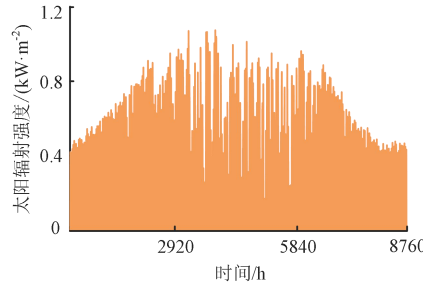


图 B2 年光照强度曲线

Fig.B2 Annual light intensity curve

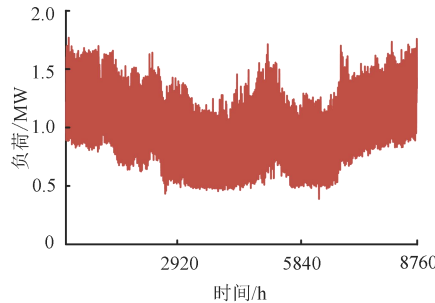


图 B3 年负荷曲线

Fig.B3 Annual load curve

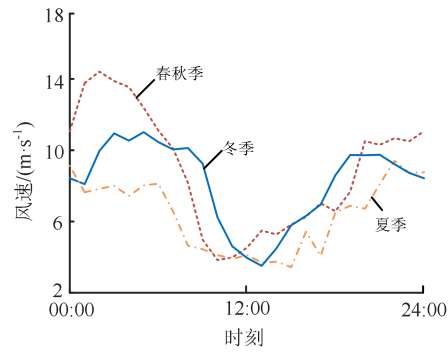


图 B4 典型日的风速曲线
Fig.B4 Wind speed curves of typical days

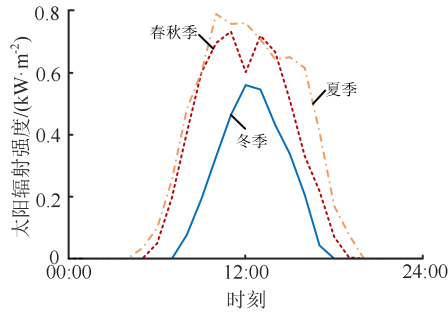


图 B5 典型日光照强度曲线
Fig.B5 Light intensity curves of typical days

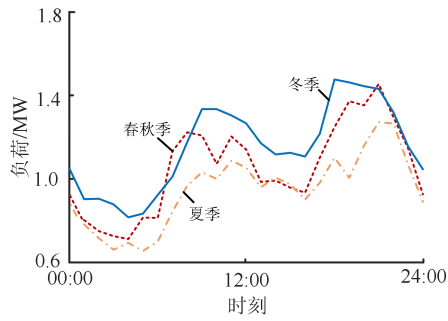


图 B6 典型日的负荷曲线
Fig.B6 Load curves of typical days

表 B1 分布式电源的参数
Table B1 Parameters of distributed generators

分布式电源	安装费用	年运行维护费用	寿命
风力发电机	10000 元/kW	100 元/kW	20 a
光伏阵列	10000 元/kW	20 元/kW	25 a
柴油发电机	500 元/kW	15 元/kW	20 a
电解槽	2210 元/kW	120 元/kW	15 a
燃料电池	4550 元/kW	18 元/kW	6 a
储氢罐	1.95 元/(kW·h)	27 元/(kW·h)	25 a