

计及信息间隙决策理论的含电动汽车充电负荷的微电网多目标规划

彭巧¹,王秀丽¹,邵成成¹,石硕¹,齐世雄¹,王智冬²,严胜³

(1. 西安交通大学 电气工程学院,陕西 西安 710049;2. 国网经济技术研究院有限公司,北京 102209;

3. 国家电网有限公司,北京 102209)

摘要:为了建立能同时考虑运行层面电动汽车充电和规划层面负荷长期增长的微电网,分析了微电网规划的经济成本。针对电动汽车充电导致的负荷波动和经济效益之间的矛盾问题,构建了多目标规划模型;针对负荷长期增长的不确定性,采用信息间隙决策理论进行模拟。通过模糊隶属度函数加权模糊规划处理,建立了考虑不确定性的含电动汽车充电控制的微电网最大满意度规划模型,对微电网进行协调规划。最后,通过仿真算例验证了所提多目标规划模型具有平衡经济性和负荷波动的作用,该作用能够帮助规划决策者以最优的成本应对负荷的不确定性,并进一步研究了微电网与大电网交互时,对电动汽车接入产生的影响。

关键词:微电网;电动汽车;多目标加权模糊规划;信息间隙决策理论;不确定性

中图分类号:U 469.72;TM 715

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202012013

0 引言

随着能源危机和环境问题日益突出,急需实施绿色环保的可持续发展战略。目前政府正逐渐加强对可再生能源的扶持力度来提高其占有率和渗透率,同时也开始大力推动电动汽车的发展。电动汽车接入电网时既可以作为移动负荷,又具备储能装置的特性^[1]。为了真正减少依赖化石燃料的现象,最有效的方式是将电动汽车和分布式电源融合接入微电网中,充分利用清洁电能,同时提高微电网整体的经济和环境效益^[2]。

然而复杂微电网的规划具有很大的挑战性:一方面电动汽车的接入会给微电网的负荷带来波动,如果不进行控制,容易出现微电网负荷“峰上加峰”的现象;另一方面由于历史数据的缺乏,准确预测微电网的负荷是比较困难的^[3],在规划决策中低估或夸大不确定性的影响都可能危及微电网的供电可靠性和成本效益。因此,有必要同时考虑运行层面电动汽车的充电控制和规划层面负荷长期的不确定性,确定微电网的规划,以降低微电网的运行风险,提高微电网经济性。

对于电动汽车接入电网,相关研究集中在调度与规划领域。文献[4]针对电动汽车接入城市能源

互联网后进行电网规划时所产生的影响进行分析。文献[5]为了充分加大电动汽车参与微电网调度的积极性,提出了一种动态电价调整的策略,使得微电网中分布式能源和电动汽车在不平衡率的调控下进行协调。文献[6]对电动汽车入网和储能系统进行模块化封装,研究了并网型微电网的电动汽车能量管理、储能优化配置和运行。文献[7]将电动汽车看成可移动式储能,在一定程度上代替固定式储能的作用,并运用粒子群-模拟退火混合算法对微电网系统能量单元进行规划。在已有文献中,针对电动汽车充放电控制的研究大多采用集中式控制方法^[8]。文献[9-11]分别以总负荷方差最小、购电成本最小和负荷峰值降低最多为优化目标对电动汽车进行集中式控制。文献[12]提出了一种在交直流混合微电网中采用多目标规划的方法,在减小负荷波动的同时降低了优化配置成本。然而,上述研究均为电动汽车在具有确定性负荷的微电网中的规划问题,并未考虑规划过程中微电网面临的不确定性问题。

目前微电网负荷不确定性的建模大多是考虑负荷的短期随机性,根据确定的概率分布或历史数据,利用随机规划的方法求解。但是对于负荷的长期需求增长,往往难以获得其概率分布或者历史数据,随机规划方法并不适用。鲁棒优化和信息间隙决策理论IGDT(Information Gap Decision Theory)是2种基于不确定性集的优化方法,可用来处理负荷的长期不确定性。与鲁棒优化相比,IGDT不需要不确定量的边界,即所需要的不确定量信息较少。该方法可在不确定量波动范围和不确定量概率分布均未知的情况下,量化不确定性^[13]。文献[14]在电力市场领域通过IGDT模拟电力市场价格的不确定性,为机

收稿日期:2020-07-24;修回日期:2020-10-23

基金项目:国家电网公司科技项目(未来电网形态及其演进路线);中国博士后科学基金资助项目(2017M623172)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (Research on Morphologies and Evolution Pathways of Future Power System) and China Postdoctoral Science Foundation Project(2017M623172)

会寻求者和风险规避者建立鲁棒优化模型,并确定分配原则。文献[15]在电力系统的扩展规划中采用IGDT处理风电的不确定性,寻求最优的新增线路,但其考虑的是非线性的模型。文献[16]应用IGDT处理负荷增长的长期不确定性,建立了微电网多时段扩展规划模型,但没有考虑电动汽车接入微电网的影响。

因此,本文将研究计及IGDT的含电动汽车充电负荷的微电网多目标规划问题。首先基于具有确定性负荷的微电网规划模型,分析电动汽车的加入带来的波动影响,同时模拟长期的负荷增长,建立具有不确定性的多目标规划模型;然后通过模糊隶属度函数加权模糊规划处理^[17]的方法建立最大满意度规划模型,协调电动汽车充电与经济性之间的矛盾关系,寻找应对负荷不确定性问题的最优成本;最后通过算例对所提方法的可行性进行验证。

1 具有确定性负荷的微电网多目标规划模型

微电网投建既要考虑其成本效益,又要满足其内部日益增长的负荷需求。拟建设的微电网规划目标为:既要使投资成本和运行成本最小,又要在负荷日益增长和电动汽车的接入成为普遍现象的情况下,尽可能地减少负荷波动,保证微电网与大电网交互功率在合理的范围内。拟建设的微电网如图1所示。

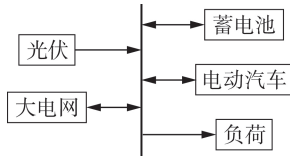


图1 微电网框架图

Fig.1 Block diagram of microgrid

微电网规划的变量为光伏设备和储能装置的投资新建量、电动汽车的充电安排及微电网向大电网购售电的安排,为多阶段混合整数规划问题。在微电网投建的年限内,设周期为15 a,以5 a为1个阶段,5 a内负荷保持不变,5 a后负荷增长(具体表现为在每个阶段初期新建光伏设备和储能装置)。因此,微电网中光伏设备和储能装置的初期投建量要留有一定的增长空间。

1.1 目标函数

(1)目标函数1。

以微电网规划的总成本最小为目标函数1,该函数包括光伏设备和储能装置的一次设备投资成本、运行维修成本、电动汽车的充电成本以及微电网与大电网的交互成本,如式(1)所示。

$$\min F^{\text{eco}} = \frac{A^v \sum_{i \in V} c_{t,i}^v (x_{t,i}^v - x_{t-1,i}^v) + A^{\text{bat}} \sum_{k \in B_{\text{BAT}}} c_{t,k}^{\text{bat}} (x_{t,k}^{\text{bat}} - x_{t-1,k}^{\text{bat}})}{\sum_{t=1}^T (1+r)^{Y(t-1)}} + \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{y=1}^Y \sum_{i \in V} c_{t,i}^{\text{vm}} x_{t,i}^v}{(1+r)^{y-1}} + \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{y=1}^Y \sum_{d=1}^D N_d \sum_{j=1}^J c_{t,j}^{\text{gr-b}} p_{t,j}^{\text{car}}}{(1+r)^{y-1}} + \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{y=1}^Y \sum_{d=1}^D N_d \sum_{j=1}^J (c_{t,j}^{\text{gr-b}} p_{t,j}^{\text{gr-b}} - c_{t,j}^{\text{gr-s}} p_{t,j}^{\text{gr-s}})}{(1+r)^{y-1}} \quad (1)$$

$$A^v = \frac{r(1+r)^{n_v}}{(1+r)^{n_v} - 1} \quad (2)$$

$$A^{\text{bat}} = \frac{r(1+r)^{n_{\text{bat}}}}{(1+r)^{n_{\text{bat}}} - 1} \quad (3)$$

其中, F^{eco} 为微电网规划的总成本; V, B_{BAT} 分别为光伏设备、储能装置集合; i, k 分别为光伏设备、储能装置的类别编号; $c_{t,i}^v, c_{t,k}^{\text{bat}}, c_{t,i}^{\text{vm}}, c_{t,j}^{\text{gr-b}}$ 和 $c_{t,j}^{\text{gr-s}}$ 分别为光伏设备在第 t 阶段的单位安装成本、储能装置在第 t 阶段的单位安装成本、光伏设备在第 t 阶段的单位维修成本、微电网在第 t 阶段第 j 时段从大电网购电的电价和向大电网售电的电价; $x_{t,i}^v, x_{t,k}^{\text{bat}}$ 分别为第 i 类光伏设备、第 k 类储能装置在第 t 阶段的总投建数量; $p_{t,j}^{\text{car}}, p_{t,j}^{\text{gr-b}}$ 和 $p_{t,j}^{\text{gr-s}}$ 分别为第 t 阶段第 j 时段电动汽车的充电功率、微电网从大电网的购电功率和向大电网的售电功率; N_d 为1年中典型日 d 的持续天数; D 为典型日总类别数; $1/(1+r)^{y-1}$ 为折现到第 y 年的成本起始值^[18], r 为年利率; $T=3$,为总阶段数; $Y=5$,为各阶段内的总年数; $J=24$,为一天中的总时段数; A^v, A^{bat} 分别为光伏设备、储能装置根据自身寿命折算到等年值的比例; n_v, n_{bat} 分别为光伏设备、储能装置的使用寿命。

(2)目标函数2。

为了减少电动汽车充电的影响、抑制负荷曲线波动,构建目标函数2使电动汽车在进行有序充电^[12]的同时还能实现削峰填谷。目标函数2为:

$$\min f_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^D N_d \sum_{j=1}^J \left| \frac{1}{J} \left(\sum_{j=1}^J P_j^{\text{ld}} + p_{t,j}^{\text{car}} \right) - P_j^{\text{ld}} - p_{t,j}^{\text{car}} \right| \quad (4)$$

其中, f_2 为负荷波动量; P_j^{ld} 为第 j 时段的负荷。

1.2 约束条件

规划的约束条件包括自然资源约束、设备约束、购售电约束和功率平衡约束等。

(1)自然资源约束。

一般而言,投建设备受到自然资源的限制,其约束条件为:

$$0 \leq \sum_{i \in V} x_{t,i}^v \leq N_t^{m-v} \quad (5)$$

$$0 \leq \sum_{k \in B_{\text{BAT}}} x_{t,k}^{\text{bat}} \leq N_t^{m-\text{bat}} \quad (6)$$

其中, $N_t^{m_v}$ 、 $N_t^{m_{bat}}$ 分别为光伏设备、储能装置在第 t 阶段内所能安装的最大数量。

(2) 光伏机组约束。

$$P_{t,i,j}^v \leq x_{t,i}^v P_{v,i}^{max} \quad (7)$$

其中, $P_{t,i,j}^v$ 为光伏设备在第 t 阶段第 j 时段内的实际出力; $P_{v,i}^{max}$ 为光伏设备的装机容量。

(3) 储能装置约束。

$$E_{k,j+1}^{bat} = E_{k,j}^{bat} + (P_{k,j}^{ch} - P_{k,j-1}^{ch}) \eta_k^{bat, ch} - \frac{(P_{k,j}^{dch} - P_{k,j-1}^{dch})}{\eta_k^{bat, dch}} \quad k \in B_{BAT} \quad (8)$$

$$\underline{E}_k^{bat} \leq E_{k,j}^{bat} \leq \bar{E}_k^{bat} \quad k \in B_{BAT} \quad (9)$$

$$0 \leq P_{k,j}^{ch} \leq \beta_{k,j}^{bat} \bar{P}_k^{ch} \quad k \in B_{BAT} \quad (10)$$

$$0 \leq P_{k,j}^{dch} \leq (1 - \beta_{k,j}^{bat}) \bar{P}_k^{dch} \quad k \in B_{BAT} \quad (11)$$

其中, $\eta_k^{bat, ch}$ 、 $\eta_k^{bat, dch}$ 分别为储能装置的充、放电效率; $E_{k,j}^{bat}$ 为储能装置在第 j 时段的容量; $\bar{E}_k^{bat}$ 、 $\underline{E}_k^{bat}$ 分别为储能装置容量的上、下限; $P_{k,j}^{ch}$ 、 $P_{k,j}^{dch}$ 分别为储能装置的充、放电功率; $\bar{P}_k^{ch}$ 、 $\bar{P}_k^{dch}$ 分别为储能装置的最大充、放电功率; $\beta_{k,j}^{bat}$ 为 0-1 变量, 其取值为 0 时表示储能装置放电, 其取值为 1 时表示储能装置充电, 该变量保障储能装置不同时进行充放电。

(4) 电动汽车约束。

$$0 \leq p_{t,j}^{car} \leq p_{t,j}^{car, max} \quad (12)$$

$$E_{t,j}^{car, min} \leq E_{t,j}^{car} \leq E_{t,j}^{car, max} \quad (13)$$

其中, $p_{t,j}^{car, max}$ 为电动汽车在第 t 阶段第 j 时段的充电功率上限; $E_{t,j}^{car}$ 及 $E_{t,j}^{car, max}$ 、 $E_{t,j}^{car, min}$ 分别为电动汽车在第 t 阶段第 j 时段的容量及其上、下限。据统计调查, 电动汽车在一天内 90% 的时段都处于不使用的停滞状态, 且电动汽车电池荷电状态控制在其总容量的 20%~90%^[5]。

(5) 功率平衡约束。

$$\sum_{i \in V} P_{t,i,j}^v + \sum_{k \in B_{BAT}} P_{k,j}^{dch} + P_{t,j}^{gr, b} = P_j^{ld} + \sum_{k \in B_{BAT}} P_{k,j}^{ch} + P_{t,j}^{gr, s} + p_{t,j}^{car} \quad (14)$$

(6) 购售电约束。

$$0 \leq P_{t,j}^{gr, b} \leq \beta_{j,t}^{gr, b} P_{j,t}^{gr, b, max} \quad (15)$$

$$0 \leq P_{t,j}^{gr, s} \leq \beta_{j,t}^{gr, s} P_{j,t}^{gr, s, max} \quad (16)$$

$$\beta_{j,t}^{gr, s} + \beta_{j,t}^{gr, b} \leq 1 \quad (17)$$

其中, $P_{t,j}^{gr, b, max}$ 、 $P_{t,j}^{gr, s, max}$ 分别为购、售电量的上限; $\beta_{j,t}^{gr, b}$ 、 $\beta_{j,t}^{gr, s}$ 为 0-1 变量, $\beta_{j,t}^{gr, s} = 0$ 和 $\beta_{j,t}^{gr, b} = 1$ 时表示购电状态, $\beta_{j,t}^{gr, s} = 1$ 和 $\beta_{j,t}^{gr, b} = 0$ 时表示售电状态, $\beta_{j,t}^{gr, s}$ 、 $\beta_{j,t}^{gr, b}$ 可保障在同一时段微电网具有唯一的购售电状态。

(7) 交互功率波动约束。

大电网与微电网在单位时段内进行的交互功率不能过多, 否则会对大电网和微电网造成一定的冲击, 而且微电网独立运行的能力会减弱, 因此需要对代表交互强度的交互功率波动进行约束^[19]。

$$P_{t,j}^{gr, \Delta} = P_{t,j}^{gr, b} - P_{t,j}^{gr, s} \quad (18)$$

$$|P_{t,j}^{gr, \Delta} - P_{t,j-1}^{gr, \Delta}| \leq SS_n \quad (19)$$

其中, $P_{t,j}^{gr, \Delta}$ 为在第 t 阶段第 j 时段微电网向大电网购电和售电的功率差; SS 为大电网自身可以承受的功率变化率的上限; S_n 为微电网中电源总容量。

2 计及 IGDT 的微电网多目标规划模型

构建计及 IGDT 的微电网多目标规划整体流程如图 2 所示。

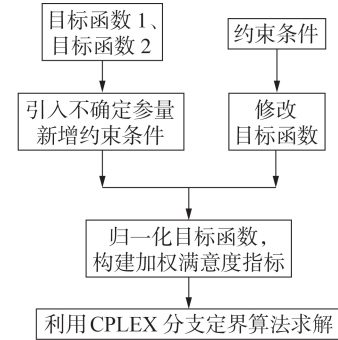


图2 计及 IGDT 的微电网多目标规划流程

Fig.2 Flowchart of multi-objective planning of microgrid based on IGDT

2.1 计及 IGDT 的多目标规划模型

首先利用 IGDT 模拟负荷增长的长期不确定性。IGDT 能够很好地描绘难以获取的概率分布函数的不确定量, 并且能够在保证得到模型预期目标的同时使不确定量的变化量最大化。

第 1 节中微电网的规划模型没有考虑参数的不确定性, 负荷采用预测值进行计算。但在实际中负荷是难以预测的, 特别是长期运行的负荷受经济发展的影响较大, 具有较大的不确定性。负荷的预测偏差将影响微电网的规划: 当负荷实际值高于预测值时, 微电网难以满足负荷需求, 使得规划结果不可行。因此本文具体讨论如何利用 IGDT 模拟不确定性负荷量, 得到具有不确定性负荷量的微电网规划模型。假设存在不确定性负荷量的优化模型为:

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_0) \\ \text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{H}(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_0) = 0 \\ \mathbf{G}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \leq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (20)$$

其中, $f(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_0)$ 为目标函数; $\mathbf{H}(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_0)$ 为等式约束; $\mathbf{G}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$ 为不等式约束; $\mathbf{x}_1$ 、 $\mathbf{x}_2$ 为决策变量; $\mathbf{x}_0$ 为不确定性负荷量。利用 IGDT 描述 $\mathbf{x}_0$, 即:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_0 \in U(\psi, \tilde{\mathbf{x}}_0) \\ U(\psi, \tilde{\mathbf{x}}_0) = \left\{ \mathbf{x}_0 \left| \left\| \frac{\mathbf{x}_0 - \tilde{\mathbf{x}}_0}{\tilde{\mathbf{x}}_0} \right\| \leq \psi, \psi \geq 0 \right. \right\} \end{cases} \quad (21)$$

其中, $\tilde{\mathbf{x}}_0$ 为不确定量的预测值; ψ 为不确定量的偏差系数。

为使不确定量的偏差系数最大,式(20)、(21)所述优化模型的IGDT模型为:

$$\begin{cases} \max \psi \\ \text{s.t.} \begin{cases} \bar{f} \leq (1+\sigma)f_0 \\ H(x_2, x_0) = 0 \\ G(x_1, x_2) \leq 0 \\ f_0 = \min f(x_1, \tilde{x}_0) \\ \bar{f} = \max f(x_1, x_0) \end{cases} \end{cases} \quad (22)$$

其中, f_0 为原目标函数的基准值,表示不确定参数取预测值时的最小值; $\bar{f}$ 为不确定参数变化时能接受的目标函数上限; σ 为规避系数,表示决策者能接受的变化范围。

在含有确定性负荷的模型中,目标函数1描述的是微电网经济成本最小,记为 F_0^{eco} 。当不确定参量 $x_0 = (1+\psi)\tilde{x}_0$ 时,原目标函数1取得最大值,记为 $\bar{F}^{\text{eco}}$ 。则微电网的IGDT规划模型为:

$$\begin{cases} \max \psi \\ \text{s.t.} \begin{cases} \bar{F}^{\text{eco}} \leq (1+\sigma)F_0^{\text{eco}} \\ \text{式(5)—(19)、(21)} \\ F_0^{\text{eco}} = \min f(x_1, \tilde{x}_0) \\ \bar{F}^{\text{eco}} = \max f(x_1, x_0) \\ P^{\text{ld}} = (1+\psi)\tilde{P}^{\text{ld}} \\ F_0^{\text{eco}} = F_0^{\text{eco}} | (P^{\text{ld}} = \tilde{P}^{\text{ld}}) \end{cases} \end{cases} \quad (23)$$

其中, $F_0^{\text{eco}} = F_0^{\text{eco}} | (P^{\text{ld}} = \tilde{P}^{\text{ld}})$ 表示负荷取预测值 $\tilde{P}^{\text{ld}}$ 时,目标函数取到最小值。

另外,本文引入经济学的概念定义边际偏差系数。以数学形式表示为偏差系数的变化量与总成本的变化量的比值,即:

$$M_{\text{MC}}(\psi) = \Delta\psi / \Delta C_T \quad (24)$$

其中, $M_{\text{MC}}(\psi)$ 为边际偏差系数; $\Delta\psi$ 为偏差系数的变化量; ΔC_T 为总成本的变化量。边际偏差系数表示随着单位总成本增加,偏差系数增长,进而可得高性价比的规避系数值。

负荷由确定性增长变成不确定性增长,目标函数2修改为:

$$\min f_2' = \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^D N_d \sum_{j=1}^J \left[\sum_{j=1}^J (1+\psi)P_j^{\text{ld}} + p_{t,j}^{\text{car}} \right] / J - (1+\psi)P_j^{\text{ld}} - p_{t,j}^{\text{car}} \quad (25)$$

综上,微电网的确定性多目标规划模型则转变为考虑负荷长期不确定增长的IGDT鲁棒优化模型。

2.2 多目标模型的加权模糊化处理

上述模型是多目标模型,若单独求解目标函数1,会导致结果在某个时段电动汽车充电过多,集中

充电,造成负荷波动过大。若单独求解目标函数2,则经济性又将无法保证。因此,为了协调2个目标函数,本文首先进行模糊化处理将目标函数归一化,分别表示出各个目标函数对各自解的满意度,再通过加权满意度指标法^[20]求得最优的折中解。

首先,如附录A中图A1所示,选取“梯形”函数建立任意1个优化目标的隶属度函数,即:

$$\mu(\psi) = \begin{cases} 0 & \psi \leq \psi_{\max} - \xi^1 \psi_{\max} \\ \frac{\psi - \psi_{\max} + \xi^1 \psi_{\max}}{\xi^1 \psi_{\max}} & \psi_{\max} - \xi^1 \psi_{\max} < \psi \leq \psi_{\max} \\ 1 & \psi > \psi_{\max} \end{cases} \quad (26)$$

$$u(f_2') = \begin{cases} 1 & f_2' \leq f_{2\min}' \\ \frac{f_{2\min}' + \xi^2 f_{2\min}' - f_2'}{\xi^2 f_{2\min}'} & f_{2\min}' < f_2' \leq f_{2\min}' + \xi^2 f_{2\min}' \\ 0 & f_2' > f_{2\min}' + \xi^2 f_{2\min}' \end{cases} \quad (27)$$

其中, $\psi_{\max}$ 、 $f_{2\min}'$ 分别为目标函数1、2中的最优解; ξ^1 和 ξ^2 为弹性满意系数, $\psi_{\max} - \xi^1 \psi_{\max}$ 和 $f_{2\min}' + \xi^2 f_{2\min}'$ 分别为目标函数1、2所能接受的最高值和最低值; $\mu(\psi)$ 和 $u(f_2')$ 为每个优化目标的满意度,当 $\mu(\psi) = u(f_2') = 0$ 时表示决策者完全不满意某个目标函数的结果,当 $\mu(\psi) = u(f_2') = 1$ 时表示决策者完全满意某个目标函数值的结果^[17]。

当目标函数只有2个时,可以将2个满意度进行加权,则得到综合满意度 W 为:

$$W = \lambda_1 \mu(\psi) + \lambda_2 u(f_2') \quad (28)$$

其中, $\mu(\psi)$ 和 $u(f_2')$ 分别为对规划经济性和负荷波动的满意度; λ_1 和 λ_2 为权重系数,且 $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ 。

综上所述,经过模糊规划处理可以得到整体的单目标模型如式(29)所示。该模型为混合整数线性规划问题,可利用成熟的数学优化求解器 CPLEX 中的分支定界算法进行求解。

$$\begin{cases} \max W = \lambda_1 \mu(\psi) + \lambda_2 u(f_2') \\ \text{s.t.} \begin{cases} 0 \leq \mu(\psi) \leq 1 \\ 0 \leq u(f_2') \leq 1 \\ \bar{F}^{\text{eco}} \leq (1+\sigma)F_0^{\text{eco}} \\ \text{式(5)—(19)、(21)、(25)—(27)} \\ F_0^{\text{eco}} = \min f(x_1, \tilde{x}_0) \\ \bar{F}^{\text{eco}} = \max f(x_1, x_0) \\ P^{\text{ld}} = (1+\psi)\tilde{P}^{\text{ld}} \\ F_0^{\text{eco}} = F_0^{\text{eco}} | (P^{\text{ld}} = \tilde{P}^{\text{ld}}) \end{cases} \end{cases} \quad (29)$$

3 算例分析

3.1 算例介绍

本文基于某实际微电网搭建计及IGDT的含电

动汽车充电负荷的微电网多目标规划模型。该微电网为工业园区微电网,内部的电动汽车供给员工使用。根据屋顶面积确定光伏设备的最大投建数目为49台,利用光伏资源模拟软件Meteonorm模拟了1a的光照日辐射量,确定光伏设备出力。可选择的光伏设备见附录A中表A1;可选择的储能装置见附录A中表A2;典型负荷数据见附录A中图A2。

对于电价只计算直购电价,直购电价采用分时电价方式,上网电价根据当地政策而定。在工程实际中,一般保证微电网与大电网的功率波动控制在合理范围内,本文取17%^[19]。微电网停车场内共有电动汽车100辆,其百千米的耗电量为13.9 kW·h,额定充电功率为3 kW,电池容量为21.6 kW·h,荷电状态的上、下限分别为90%、20%。

假设在未来的15 a内,光照辐射量数据保持不变,而负荷以5 a为单位增长。算例所研究的时间周期为15 a,阶段周期为5 a,单位时段间隔为1 h。

3.2 规划结果分析

为了探讨IGDT模型在系统中所扮演的角色,本文首先对比确定性模型和IGDT模型之间的规划结果。从经济成本和负荷波动2个角度分析,列出确定性模型和IGDT模型的成本和波动量如表1所示。

表1 2种模型的规划结果

Table 1 Planning results of two models

模型	经济成本/万元			负荷波动量/kW
	阶段 I	阶段 II	阶段 III	
确定性	484	291	350	31 549.96
IGDT	484	439	539	34 144.36

由表1可见,IGDT模型的成本和波动量均比确定性模型有所增加。在确定性模型下,微电网按照预测负荷进行投资,相当于负荷的偏差系数为0。而在IGDT模型下,负荷的偏差系数为4.48%,可以理解为生成的规划方案在规划期内能够承受的负荷最大波动范围是4.48%,即系统承受负荷长期不确定性的鲁棒性水平是4.48%。此时,规划决策者要承担规避系数为0.3的投资预算,即系统投资运算增加30%,因此规划结果中总成本在阶段II、III中均增加较多。另外波动量也有所增加,因为系统承受的基础负荷变动较大,而电动汽车的总负荷相对于基础负荷而言较小,因此系统总波动量上升。

3个阶段光伏设备和储能装置的投建情况为:在阶段I—III分别投建29、10、10台光伏设备,总共49台;在阶段I投建4台储能装置,后续不再投建。

结合投建情况和表1可以看出3个规划阶段的关系:阶段I总成本较大,因为阶段I的基础投资较大,投资的光伏设备超过一半,达到总数量的59.2%,负荷也按照预测值增长,所以2种模型成本

相同,这符合通常的实际情况;而阶段II中2种模型的总成本均最小,此时负荷增长较少,光伏设备有所增加但总体小于阶段I,因此总成本最小;但阶段III中IGDT模型相较于确定性模型总成本增加到最大,这是因为负荷的偏差系数为4.48%,负荷在预测值的基础上增长较多,光伏设备的投建达到了算例的屋顶面积上限,只能通过储能装置放电和增加与主网的交互购电功率来满足负荷。

可以看到,IGDT模型可以承受负荷增长不确定性的风险,体现了IGDT模型的优越性。

3.3 规避系数的灵敏度分析

以上探讨了IGDT模型在系统中扮演的角色,为了进一步分析关键控制参数的影响,本文求解了不同规避系数下的IGDT模型并分析其对规划结果的影响。

规避系数 σ 代表了规划者能接受的由不确定性问题导致的成本增加的百分比。通常规避系数越大,规划者能承受的规划方案的预算越大,规划模型应对不确定性问题的能力越强。

图3显示了通过求解计及IGDT的多目标模型生成的规划方案应对负荷长期增长不确定性时,鲁棒性水平偏差系数 ψ 和总成本这2个优化变量相对于不同规避系数 σ 的变化趋势。本文设置式(23)中规避系数 σ 以0.05的步长从0.25增加到0.55。

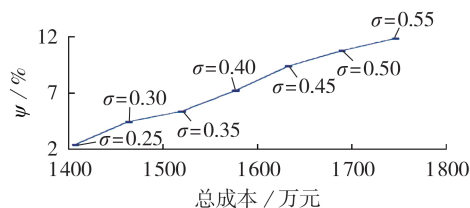


图3 不同 σ 下的优化结果

Fig.3 Optimization results under different values of σ

随着规避系数的增加,系统的鲁棒性水平偏差系数 ψ 从2.43%增加到11.86%,成本从1408万元增加到1745万元。系统的可供负荷需求量越大,代表了系统对负荷不确定性承受能力的提升,在此情况下的规划方案能更好地应对负荷增长的长期不确定性,规划决策者可以根据自己能承受的成本来选择规避系数以此规避切除负荷的风险。

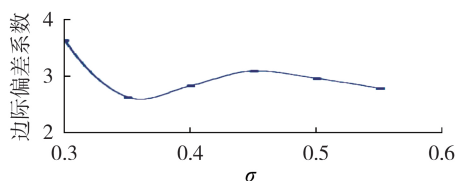
下面分析成本在不同规避系数不同阶段的具体变化,统计微电网向大电网购售电的成本差值以及电动汽车的充电成本,结果见表2。从表中可以看出,随着规避系数的增大,购售电成本和电动汽车成本在每个阶段均增加,且在阶段III增加最大。

以上分析了成本如何应对负荷不确定性的变化,接下来分析电动汽车在负荷不确定性问题中扮演的角色。附录A中图A3为电动汽车在不同规划

表2 不同 σ 下成本的变化Table 2 Change of costs under different values of σ

σ	成本类型	经济成本 / 万元			总成本 / 万元
		阶段 I	阶段 II	阶段 III	
0.25	购售电	221.71	254.83	337.80	814.34
	电动汽车	56.03	58.03	62.89	176.95
0.40	购售电	225.64	320.98	423.99	970.61
	电动汽车	58.48	61.62	69.48	189.58
0.55	购售电	226.23	387.55	506.23	1120.01
	电动汽车	60.04	68.81	80.25	209.10

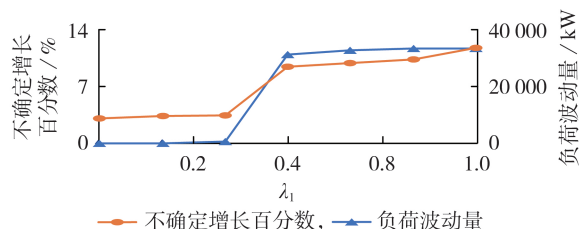
年份下采用不同规避系数时的春、夏、秋、冬不同时期1 d的充电总量,可以看出随着规避系数的增大,电动汽车的充电量增加,以此来“跟上”负荷的增长,起到减少负荷波动的作用。由图A3可知,经济性和规避风险之间存在矛盾,为了求得高性价比的规避系数值,使得单位总成本的增加能够使偏差系数的增长最大,引入经济学的概念定义了边际偏差系数。根据式(24)进行计算,可以得到边际偏差系数见图4。由图可知,曲线的最高点在规避系数 $\sigma=0.3$ 时取到,该点在经济性和规避风险权衡时具有高性价比。因此规划决策者可以参考此结果来衡量应对负荷增长的投资成本。

图4 边际偏差系数随 σ 变化的曲线Fig.4 Curve of marginal deviation coefficient vs. σ

为了分析关键边界条件对结果的影响,本文进一步求解了电价改变时的IGDT多目标模型并分析其对规划结果的影响,具体过程见附录B。

3.4 规划权重系数对电动汽车的影响

为了验证电动汽车减少负荷波动的情况,在式(28)中分别选取不同的权重系数 λ_1 和 λ_2 进行求解,图5为2个目标随 λ_1 的变化情况。

图5 2个目标随 λ_1 的变化情况Fig.5 Two objectives under variation of λ_1

在相同的成本下,不确定增长百分数越大,可以理解为可供的负荷需求量越大,则供给负荷的性价比越高,经济性越好,单位成本越小。分析图5可知,

随着 λ_1 减小, λ_2 增大,微电网的可供需求呈上升趋势,单位成本呈下降趋势,但波动幅度也逐渐增加。

选取2个典型的权重系数 $\lambda_1=0.3$ 、 $\lambda_2=0.4$ 进行比较分析,并在一年中的8个典型的负荷日中选取春天工作日和夏天休息日这2个典型日,附录C中图C1为1 d中24 h的电动汽车充电功率曲线。由图可知,在 λ_1 较小时,春天工作日和夏天休息日的充电时间都比较分散,负荷波动较小,而在 λ_1 较大时,春天和夏天都出现了充电尖峰,集中在凌晨充电,这是因为凌晨的电价较低,符合经济性需求。另外春天工作日的用电高峰在12:00—20:00,而夏天休息日的用电高峰在20:00至次日02:00,电动汽车在春天工作日的充电时间主要在01:00—07:00和22:00—24:00,在夏天休息日的充电时间涵盖12:00—14:00,这种错峰充电有利于削峰填谷,平滑负荷曲线。

3.5 微电网与大电网交互的影响分析

优选一系列权重系数值,最终取 $\lambda_1=0.35$ 作为接近于图5所示的2条曲线交点的近似优化值,取规避系数 $\sigma=0.3$ 为系统规避风险的高性价比值。在此情况下,分析不同阶段的购电量,附录C中图C2为微电网从大电网购电的电量。由图可知,在第1、6、11年,微电网购电量呈上升趋势,微电网与大电网之间的功率交互逐阶段增多。

选取秋天的工作日作为典型日进行分析,电动汽车的充电情况如图6所示。可以看到,当规划年增加、购电量增加时,电动汽车的充电曲线由1条较为平滑的曲线变成有2个峰值再到3个峰值的曲线,充电分布由较为分散变成非常集中,因此适当减少微电网从大电网的购电量有利于引导电动汽车合理充电减小负荷波动。

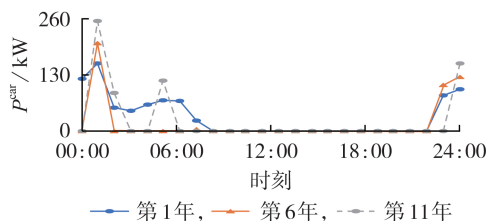


图6 秋天工作日电动汽车充电情况

Fig.6 Charging curves of electric vehicles in autumn workdays

4 结论

本文基于微电网规划系统框架,提出计及IGDT考虑电动汽车充电负荷的微电网规划模型。采用IGDT模拟负荷增长的长期不确定性;采用模糊隶属度函数加权模糊规划,协调系统投建经济性和负荷波动。经过算例验证,本文提出的规划模型不仅可以平衡经济性和负荷波动,使得电动汽车有序充电

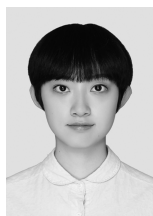
的同时起到削峰填谷的作用,还可以应对负荷不确定性的增长。规划决策者可以根据承受的成本来选择规避系数以此规避切除负荷的风险,并且引入了边际偏差系数的概念帮助决策者找到高性价比的规避系数以此确定规划方案。另外考虑到微电网与大电网交互的强弱,论证了适当地减少交互可提高微电网的独立性,有助于引导电动汽车合理充电减小负荷波动。由于IGDT的集成使程序求解变得困难,后续研究将进一步探究采用改进的算法进行高效求解。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 胡泽春,占恺峤,徐智威,等. 电动汽车与电网互动的关键问题分析与展望[J]. 电力建设,2015,36(7):6-13.
HU Zechun,ZHAN Kaiqiao,XU Zhiwei,et al. Analysis and outlook on the key problems of electric vehicle and power grid interaction[J]. Electric Power Construction,2015,36(7):6-13.
- [2] 程杉,倪凯旋,赵孟雨. 基于Stackelberg博弈的充换储一体化电站微电网双层协调优化调度[J]. 电力自动化设备,2020,40(6):49-55.
CHENG Shan,NI Kaixuan,ZHAO Mengyu. Stackelberg game based bi-level coordinated optimal scheduling of microgrid accessed with charging-swapping-storage integrated station[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(6):49-55.
- [3] HERNANDEZ L,BALADRON C,AGUIAR J M,et al. A survey on electric power demand forecasting:future trends in smart grids,microgrids and smart buildings[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials,2014,16(3):1460-1495.
- [4] 洪居华,刘俊勇,向月,等. 城市能源互联网初步认识与研究展望[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):15-25.
HONG Juhua,LIU Junyong,XIANG Yue,et al. Preliminary understanding and research prospect of urban energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(6):15-25.
- [5] 赵兴勇,王帅,吴新华,等. 含分布式电源和电动汽车的微电网协调控制策略[J]. 电网技术,2016,40(12):3732-3740.
ZHAO Xingyong,WANG Shuai,WU Xinhua,et al. Coordinated control strategy research of micro-grid including distributed generations and electric vehicles[J]. Power System Technology,2016,40(12):3732-3740.
- [6] 张明锐,谢青青,欧阳丽. 考虑电动汽车的并网型微电网储能选址定容[J]. 电力自动化设备,2016,36(9):25-32.
ZHANG Mingrui,XIE Qingqing,OUYANG Li. Sizing and siting of BESS for grid-connected microgrid with electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(9):25-32.
- [7] 李博彤,唐锴. 计及电动汽车储能特性的微电网规划模型与算法[J]. 电力建设,2017,38(2):60-65.
LI Botong,TANG Kai. Planning model and algorithm of micro-grid considering energy storage characteristics of electric vehicles[J]. Electric Power Construction,2017,38(2):60-65.
- [8] 王毅,麻秀,万毅,等. 基于分时充放电裕度的电动汽车有序充放电引导策略[J]. 电网技术,2019,43(12):4353-4361.
WANG Yi,MA Xiu,WAN Yi,et al. Sequential charge-discharge guidance strategy for electric vehicles based on time-sharing charging-discharging margin[J]. Power System Technology,2019,43(12):4353-4361.
- [9] JIAN L N,ZHENG Y C,XIAO X P,et al. Optimal scheduling for vehicle-to-grid operation with stochastic connection of plug-in electric vehicles to smart grid[J]. Applied Energy,2015,146:150-161.
- [10] SORTOMME E,ELSHARKAWI M. Optimal scheduling of vehicle-to-grid energy and ancillary services[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2012,3(1):351-359.
- [11] 黄宇,杨健维,何正友. 基于双层离散粒子群优化的智能小区车辆与家庭互动调度策略[J]. 电网技术,2015,39(10):2690-2696.
HUANG Yu,YANG Jianwei,HE Zhengyou. A dispatching strategy for V2H of intelligent community based on bilayer discrete particle swarm optimization[J]. Power System Technology,2015,39(10):2690-2696.
- [12] 丁明,史盛亮,潘浩,等. 含电动汽车充电负荷的交直流混合微电网规划[J]. 电力系统自动化,2018,42(1):32-38.
DING Ming,SHI Shengliang,PAN Hao,et al. Planning of AC/DC hybrid microgrid with integration of electric vehicles charging load[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(1):32-38.
- [13] AGHAEI J,AGELIDIS V G,CHARWAND M,et al. Optimal robust unit commitment of CHP plants in electricity markets using information gap decision theory[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2017,8(5):2296-2304.
- [14] 赵琛,张少华. 基于信息间隙决策理论的发电商电量分配策略[J]. 控制与决策,2017,32(4):751-754.
ZHAO Chen,ZHANG Shaohua. Generation asset allocation strategies based on IGDT[J]. Control and Decision,2017,32(4):751-754.
- [15] MAVALIZADEH H,AHMADI A,GANDOMAN F H,et al. Multi-objective robust power system expansion planning considering generation units retirement[J]. IEEE Systems Journal,2018,12(3):2664-2675.
- [16] CAO X Y,WANG J X,ZENG B. A chance constrained information-gap decision model for multi-period microgrid planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2018,33(3):2684-2695.
- [17] 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):149-156.
LI Hongzhong,LÜ Menglin,HU Liexiang,et al. Joint planning of microgrid considering generalized energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(7):149-156.
- [18] CHENG R,XU Z F,LIU P,et al. A multi-region optimization planning model for China's power sector[J]. Applied Energy,2015,137:413-426.
- [19] 张明锐,陈洁,杜志超,等. 考虑交互功率控制的微网经济运行[J]. 中国电机工程学报,2014,34(7):1013-1023.
ZHANG Mingrui,CHEN Jie,DU Zhichao,et al. Economic operation of micro-grid considering regulation of interactive power[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(7):1013-1023.
- [20] SHAW K,SHANKAR R,YADAV S,et al. Supplier selection using fuzzy AHP and fuzzy multi-objective linear programming for developing low carbon supply chain[J]. Expert Systems with Applications,2012,39(9):8182-8192.

作者简介:



彭巧

彭巧(1997—),女,江西抚州人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为综合能源系统(E-mail: pengqiaopq@stu.xjtu.edu.cn);

王秀丽(1961—),女,山西河曲人,教授,博士,主要研究方向为电力系统规划、电力市场等(E-mail: xiuliw@mail.xjtu.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

(下转第158页 continued on page 158)

[D]. 兰州:兰州大学,2019.

WANG Xiangpeng. Research on post-loan risk warning based on unbalanced three-classification LGBM model[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.

作者简介:

潘国兵(1978—),男,湖北襄樊人,副教授,博士,主要研究方向为光伏发电及微电网控制、电力系统数据挖掘



潘国兵

(E-mail: gbpan@zjut.edu.cn);

龚明波(1975—),男,浙江宁波人,高级工程师,主要研究方向为电能计量(E-mail: nb_gmb@163.com);

贺氏(1970—),男,浙江宁波人,高级工程师,主要研究方向为电能计量(E-mail: nbdyhm70@163.com)。

(编辑 王锦秀)

Identification method of electricity charge recovery risk of specialized transformer user based on Stacking model fusion

PAN Guobing¹, GONG Mingbo², HE Min², WU Chenghuan², TANG Xiaoqi³, YANG Lü¹, OUYANG Jing¹

(1. Institute of Distributed Energy and Microgrid, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310012, China;

2. Ningbo Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Ningbo 315000, China;

3. Zhejiang Huayun Information Technology Co., Ltd., Hangzhou 310012, China)

Abstract: Aiming at the current electricity charge recovery risk of specialized transformer users faced by electricity companies, an identification method of electricity charge recovery risk of specialized transformer users is proposed based on Stacking model fusion. Feature processing, feature construction and feature selection are carried out for the data of specialized transformer users, and the model generalization performance is optimized from the sample distribution and feature attributes. Stacking model is used to integrate multiple base learners to construct an identification model of electricity charge recovery risk for specialized transformer users. The experimental results show that, compared with other commonly used classification algorithms, the proposed method has better precision, recall rate, P - R harmonic mean value, AUC (Area Under Curve) value, and model generalization performance, and has higher identification rate of specialized transformer risk users.

Key words: specialized transformer user; electricity charge recovery; risk identification; Stacking model fusion; LGBM

(上接第134页 continued from page 134)

Multi-objective planning of microgrid with electric vehicle charging load based on information gap decision theory

PENG Qiao¹, WANG Xiuli¹, SHAO Chengcheng¹, SHI Shuo¹, QI Shixiong¹, WANG Zhidong², YAN Sheng³

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;

3. State Grid Corporation of China, Beijing 102209, China)

Abstract: In order to build the microgrid considering both the charging of electric vehicles at the operation level and the long-term increasing of load at the planning level, the economic costs of microgrid planning are analyzed. To deal with the contradiction between load fluctuation and economic benefit, a multi-objective planning model is proposed. Meanwhile to deal with the uncertainty of long-term increasing of load, the information gap decision theory is used for simulation. Then through fuzzy membership function weighted fuzzy programming, the maximum satisfaction programming model of microgrid with charging control of electric vehicle considering uncertainty is established to coordinate the planning of microgrid. Finally, the simulation results show that the proposed multi-objective programming model can balance the economy and load fluctuation, which can help the planning decision-maker to cope with the uncertainty of load at the optimal cost. Furthermore, the impact of interaction between microgrid and large grid on the access of electric vehicles is further studied.

Key words: microgrid; electric vehicles; multi-objective weighted fuzzy programming; information gap decision theory; uncertainty

附录 A

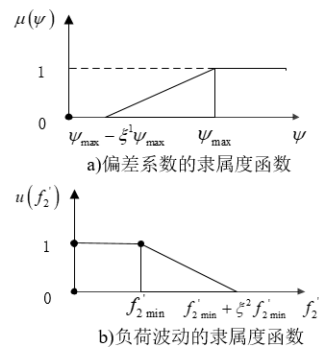


图 A1 隶属度函数

Fig.A1 Membership function

表 A1 光伏设备参数

Table A1 Parameters of photovoltaic unit

阶段	建设成本/(元 kW ⁻¹)	额定容量/kW	各阶段最大建设数目/台	寿命/a
I	6 000			
II	5 000	100	49	25
III	4 000			

表 A2 储能装置参数

Table A2 Parameters of energy storage unit

阶段	建设成本/(元 kW ⁻¹)	额定容量/kW	各阶段最大建设数目/台	寿命/a
I	1 700			
II	1 500	1 000	5	15
III	1 300			

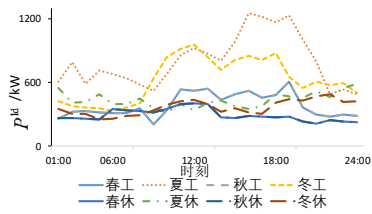


图 A2 电负荷曲线

Fig.A2 Curves of electric load demand

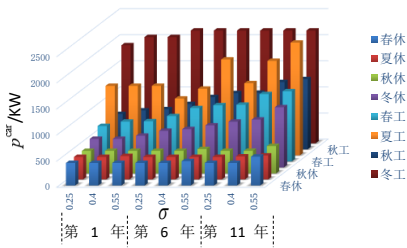


图 A3 不同规避系数下电动汽车充电的变化

Fig.A3 Change of EV charging under different σ

附录 B

前文提到电价参数采用直购电价，可以以该电价为基准，调节电价价格往上以 5% 增加，调节电价价格往下以 5% 减少，得到多目标满意度 W 和偏差系数 ψ 的结果如图 B1 所示。从图中可以看出，在基准电价附近，灵敏度很高，在电价的 0.9~1.1 之间，稍微改变电价都能带来较大的多目标满意度的变化和系统能承受的不确定性变化。特别是当电价下调时，系统满意度从 0.5 显著提升至 0.8，明显提升了系统的规划效果，显著提高了系统应对不确定性的水平。这在未来降电价的趋势下，有很实际的效用。另外可以看到：当电价降低至 70% 时，满意度接近于 1，偏差系数也达到最大，不再上升；当电价增加至 20% 时，偏差系数降低至 0，系统不再具有承受不确定性的水平。这说明系统具有一定的边界，达到边界后系统参数趋于饱和，不再敏感。

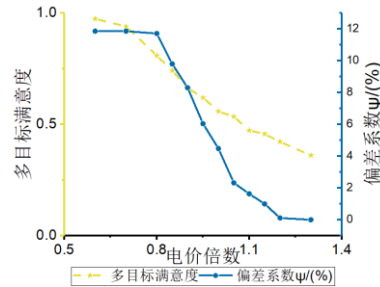


图 B1 优化变量和电价边界的关系

Fig.B1 Relationship between variables and electricity price boundaries

附录 C

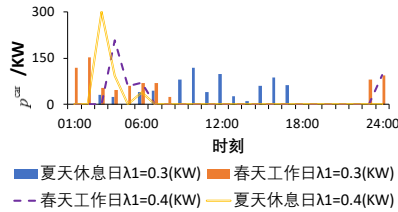


图 C1 电动汽车充电曲线

Fig.C1 Charging curves of electric vehicles

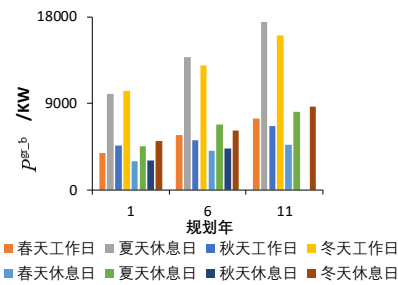


图 C2 规划年购电情况

Fig.C2 Electricity purchase during planned years