

考虑电能替代负荷的配电网承载力评估方法

张铭泽¹, 华晟辉¹, 李轶立¹, 纪元¹, 夏敏浩¹, 邢昕², 王健², 刘皓明²

(1. 国网上海市电力公司 经济技术研究院, 上海 200233; 2. 河海大学 能源与电气学院, 南京 211100)

Evaluation method of distribution network hosting capacity considering electric energy substitution load

ZHANG Mingze¹, HUA Shenghui¹, LI Yili¹, JI Yuan¹, XIA Minhao¹, XING Xin², WANG Jian²,
LIU Haoming²

(1. Institute of Economy and Technology, State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200233, China;
2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

摘要:随着我国电能替代工作的加速推进,多元电能替代负荷的大量接入对配电网的安全稳定运行带来了极大的考验,评估负荷承载力对配电网规划具有重要意义。首先分析了目前电能替代的主要负荷类型,并建立其运行模型;其次以配电网容纳负荷数量最大为目标函数,考虑源-网-荷-储侧灵活性资源运行约束与配电网安全稳定运行约束,建立了配电网负荷承载力优化模型,通过二阶锥松弛方法将其转化为二阶锥规划模型;最后通过对某实际电网的141节点算例的仿真,实现了对配电网负荷承载力的量化评估,验证了灵活性资源的优化调度与负荷调节能力对于配电网负荷承载力的提升作用。

关键词:电能替代;负荷承载力;灵活性资源;二阶锥松弛

Abstract: With the acceleration of the work of electric energy substitution in China, a large number of multiple electric energy substitution loads have been connected, which has brought great challenges to the safe and stable operation of the distribution network. Assessment of load hosting capacity is of great significance to the distribution network planning. Firstly, the main load types of electric energy substitution are analyzed, and their operation models are established. Then, taking the maximum load capacity of the distribution network as the objective function, considering the flexible resource operation constraints of source network load storage side and the safe and stable operation constraints of the distribution network, an optimization model for the load hosting capacity of the distribution network is established, which is transformed into a second-order cone programming model through the second-order cone relaxation method. Finally, through the simulation of a 141 node example of an actual power grid, the quantitative evaluation of the load hosting capacity of the distribution network is realized, and the role of the optimal scheduling and load regulation capacity of flexible resources in improving the load hosting capacity of the distribution network is verified.

Key words: electric energy substitution; load hosting capacity; flexible resources; second-order cone relaxation

0 引言

工业化进程的推进和经济的快速发展消耗了大量化石能源,使我国发展面临着能源短缺和环境污染的双重压力。电能替代是在终端能源消费环节,使用电能替代散烧煤、燃油的能源消费方式,如电采暖、电动汽车、工业电锅炉等。相比于化石能源,电能具有高效、安全、便捷等优势。然而,电能替代给社会带来经济效益和环境效益的同时,也给配电网带来了新的问题。一方面,相较于常规负

荷,电能替代负荷表现出大功率、随机性、间歇性、分散性的特点,给配电网带来峰谷差增大、线路和配变供电能力不足等诸多安全运行挑战。另一方面,电能替代负荷作为新型负荷,需求特性也有了较大改变,如电动汽车能够与电网实现双向互动,蓄热式电锅炉由于自身的热存储特性,也可以根据激励调节用电需求。同时,随着新型电力系统建设进程的不断加速,大规模高比例分布式新能源接入^[1]、负荷互动增强、交直流配电兴起^[2]、电力电子装备快速发展^[3],均使得配电网面临的形势和承担的任务发生明显变化。因此,如何评估配电网对多元电能替代负荷的承载力,并充分挖掘配电网中的灵活性资源调度潜力,是电能替代加速背景下亟需

收稿日期:2023-04-03;修回日期:2023-06-11

基金项目:国网上海市电力公司科技项目(SGSHJY00GPJS2200155)

解决的问题。

配电网负荷承载力是指满足配电网各项性能要求和约束下所能容纳负荷的极限值。文献[4]以最大接纳量、可靠性灵敏度为评价指标,提出了计及有序充电的电动汽车接纳能力量化评估方法。文献[5]通过建立基于充电桩数量的充电负荷评估模型,综合考虑电压和电流越限风险以及配变过载风险建立配电网综合运行风险,以作为充电桩接纳能力的量化指标,对配电网充电桩接纳能力评估与优化。文献[6]考虑5种不同电动汽车充电行为的不确定性和电网其他用户的供电可靠性和电压质量,对其在直流电网中的最大可容纳数量进行了计算。

上述研究集中于配电网对电动汽车的负荷承载力。关于配电网对多元负荷承载力,也有部分学者进行了研究。文献[7—8]考虑新型负荷及分布式电源的特性,选取评价指标,用基于变权理论的多层次模糊综合评价算法,对新型负荷和高比例分布式电源接入后的配电网进行了综合评估。

本文分析电能替代加速背景下接入配电网的主要负荷,考虑其用户行为、能量转换特性,建立运行模型;分析配电网中的灵活性资源,对源-网-储侧的灵活可控资源建立稳态运行模型,考虑配电网和灵活性资源的安全运行约束,建立配电网的负荷承载力模型;最后通过仿真验证了本文模型的有效性。

1 电能替代背景下柔性负荷分析

目前,电能替代以“电替煤”、“电替油”为主,本文选取不同领域中较具代表性的电能替代负荷,通过建立其负荷模型,研究配电网对其承载力。

1.1 电动汽车

“电替油”的实施目前以电动汽车(electric vehicle, EV)为主。根据文献[9],电动汽车开始充电时间满足正态分布,其概率密度函数为

$$f_s(t_s) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t_s - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] & \mu_s - 12 < t_s \leq 24 \\ \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t_s + 24 - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] & 0 < t_s \leq \mu_s - 12 \end{cases} \quad (1)$$

式中: t_s 为开始充电时间; μ_s 为 t_s 的期望; σ_s 为 t_s 的标准差。

电动私家车日行驶里程满足对数正态分布,其概率密度函数为

$$f_d(d) = \frac{1}{d\sigma_d \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln d - \mu_d)^2}{2\sigma_d^2}\right] \quad (2)$$

式中: d 为日行驶里程; μ_d 为 d 的期望; σ_d 为 d 的标准差。

根据每辆电动汽车的日行驶里程可求出其开始充电时的荷电状态(state of charge, SOC)为

$$SOC_{start} = \left(1 - \frac{d}{d_m}\right) \times 100\% \quad (3)$$

式中: SOC_{start} 为开始充电时的荷电状态; d_m 为最大续航里程。

电动汽车的充电时长计算公式为

$$T_c = \frac{(SOC_{end} - SOC_{start})E}{P_{EV} \eta_{EV}} \quad (4)$$

式中: T_c 为充电时长; SOC_{end} 为充电结束时的荷电状态; E 为电池容量; P_{EV} 为充电功率; η_{EV} 为充电效率。

通过蒙特卡洛随机抽样的方法,对单辆电动汽车负荷进行 N 次采样,即可得到在第 t 时刻电动汽车总充电负荷 $P_{sum,t}$

$$P_{sum,t} = \sum_{n=1}^N P_{charge}^{n,t} \quad t = 1, 2, \dots, 24 \quad (5)$$

式中: $P_{sum,t}$ 为 t 时刻电动汽车总充电功率; $P_{charge}^{n,t}$ 为第 n 辆电动汽车在 t 时刻的充电负荷功率。

1.2 温控负荷

电制冷/电采暖设备是“电替煤”的主要电能替代负荷之一,其类型众多,但原理与工作特性都较为相似,可以归类为温控负荷(temperature control load, TCL)。建模过程分为两个部分,分别为:标准用户的建筑热模型与设备的热电能量转换模型。

以电制冷机为例,利用一阶等效热参数模型,建立用户的建筑物热模型。

一阶等效热参数模型的微分方程可表示为

$$C \frac{dT_{in}(t)}{dt} = \frac{1}{R} [T_{out}(t) - T_{in}(t)] - Q_{AC}(t) \quad (6)$$

式中: C 为建筑物等效热容; $T_{in}(t)$ 为在 t 时刻的建筑物内部温度; R 为建筑物等效热阻; $T_{out}(t)$ 为在 t 时刻的室外气温; $Q_{AC}(t)$ 为在 t 时刻的制冷量。

热电能量转换模型包括制冷(热)量与电功率的转换关系与启停特性。一般来说,制冷(热)量与电功率的关系可以表述为

$$Q_{TCL} = \eta_{TCL} P_{TCL} \quad (7)$$

式中: Q_{TCL} 为温控负荷的制冷(热)量; η_{TCL} 为温控负荷的能效比; P_{TCL} 为温控负荷的功率。

同时,考虑到用户的热舒适度,根据室内温度的变化,运行状态 W 与室内温度的关系可以由如下分段函数表示

$$W[(n+1)t] = \begin{cases} 1 & T_{in}(nt) \geq T_{set} + \Delta t \\ 0 & T_{in}(nt) \geq T_{set} - \Delta t \\ W(nt) & T_{set} - \Delta t < T_{in}(nt) < T_{set} + \Delta t \end{cases} \quad (8)$$

式中: $W(nt)$ 为 nt 时刻设备的启停状态, 1 表示设备处于工作状态, 0 表示设备处于不工作状态; T_{set} 为用户设定温度; Δt 为根据用户的热舒适度设定的室内温度变化范围; $T_{\text{in}}(nt)$ 为 nt 时刻室内温度。

温控负荷聚合建模方式与电动汽车类似, 采用蒙特卡洛抽样, 对多个温控负荷进行聚合建模。

1.3 蓄热式电锅炉

蓄热电锅炉 (storage electric boiler, SEB) 是配置了一定储热容量的优质供热设备, 只要储热量满足一定约束条件, 蓄热电锅炉就可以对外供热。蓄热式电锅炉作为重要的电供热设备, 通过参与电网调度, 具有天然优质的对电网的调节能力^[10]。

蓄热电锅炉的电热转换约束可表示为

$$\begin{cases} H'_{\text{SEB}} = C_{\text{SEB}} P'_{\text{SEB}} \\ 0 \leq P'_{\text{SEB}} \leq P_{\text{SEB}, \max} \end{cases} \quad (9)$$

式中: H'_{SEB} 为 t 时刻电转热功率, C_{SEB} 为电热转换系数; P'_{SEB} 为 t 时刻用电功率; $P_{\text{SEB}, \max}$ 为最大电功率。

由于蓄热式电锅炉内存在一定温度差热媒之间的热传递以及储热体内外的热耗散, 导致其蓄热量随时间变化, 蓄热量与热功率的关系可表示为

$$\begin{cases} Q'_{\text{SEB}} = Q'_{\text{SEB}} + (H'_c - H'_f) \Delta t - \eta Q'_{\text{SEB}} \\ Q'_{\text{SEB}} \leq Q'_{\text{SEB}} \leq Q'_{\text{SEB}, \max} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $Q'_{\text{SEB}, \max}$ 、 $Q'_{\text{SEB}, \min}$ 分别为蓄热电锅炉蓄热量的上下限; H'_c 、 H'_f 分别为 t 时刻蓄热电锅炉的储、放热功率; η 为 t 时刻蓄热电锅炉的热损失系数。

由式(10)可知, 蓄热电锅炉 $t+1$ 时刻的蓄热量除了与 t 时刻的蓄热量有关外, 还受储热功率、放热功率和热损耗的影响。结合电热能量关系, 蓄热电锅炉的蓄热量、储热功率和放热功率应满足如下关系

$$\begin{cases} H'_{\text{SEB}} = H'_c + H'_f \\ 0 \leq H'_c \leq H_{c, \max} \\ 0 \leq H'_f \leq H_{f, \max} \\ Q'_{\text{SEB}} = Q'_{\text{SEB}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $H_{c, \max}$ 、 $H_{f, \max}$ 分别为 t 时刻储、放热功率的上限; $Q'_{\text{SEB}} = 0$ 为初始蓄热量; $Q'_{\text{SEB}} = T$ 为一个调度周期末的蓄热量。

1.4 工业电炉

在工业方面, 电炉是电能替代中的代表性设备, 广泛应用于金属冶炼、生产制造^[11]等领域。电炉 (electric stove, ES) 的运行约束可表示为

$$\begin{cases} Q'_{\text{ES}} = \lambda_{\text{ES}} P'_{\text{ES}} \\ 0 \leq P'_{\text{ES}} \leq P_{\text{ES}, \max} \end{cases} \quad (12)$$

式中: Q'_{ES} 为 t 时刻电炉输出功率; P'_{ES} 为 t 时刻电炉从电网吸收功率; λ_{ES} 为电炉电热转换效率参数; $P_{\text{ES}, \max}$ 为电炉最大功率。

2 配电网负荷承载力优化模型

2.1 目标函数

本节以一个完整的调度周期 (取 24 h) 内配电系统容纳负荷的用户功率最大化为目标函数, 具体如式(13)所示

$$\max C = \mu_1 C_{\text{EV}} + \mu_2 C_{\text{TCL}} + \mu_3 C_{\text{SEB}} + \mu_4 C_{\text{ES}} \quad (13)$$

式中: C_{EV} 为电动汽车用户数; C_{TCL} 为空调用户数; C_{SEB} 为蓄热式电锅炉用户数; C_{ES} 为工业电炉用户数; μ_1 、 μ_2 、 μ_3 、 μ_4 为权重系数, 本文均取 0.25, 可根据实际情况或需求调整。

2.2 约束条件

(1) 配电网有功-无功潮流等式约束

对于辐射状配电网, Distflow 潮流方程如式(14)所示

$$\begin{cases} \sum_{(k,i) \in E} (P'_{ki} - r_{ki} I'^2_{ki}) = P'_i + \sum_{(i,j) \in E} P'_{ij} \\ \sum_{(k,i) \in E} (Q'_{ki} - x_{ki} I'^2_{ki}) = Q'_i + \sum_{(i,j) \in E} Q'_{ij} \\ (v'_j)^2 = (v'_i)^2 - 2(r_{ki} P'_{ij} + x_{ki} Q'_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) (i'_{ij})^2 \\ (i'_{ij})^2 = \frac{(P'_{ij})^2 + (Q'_{ij})^2}{(v'_i)^2} \end{cases} \quad (14)$$

式中: P'_i 、 Q'_i 分别为 t 时刻节点 i 处的有功负荷和无功负荷; P'_{ij} 、 Q'_{ij} 、 i'_{ij} 、 r_{ki} 、 x_{ki} 分别为 t 时刻线路 (i, j) 上的有功功率、无功功率、电流幅值、电阻和感抗值; v'_i 为 t 时刻节点 i 处电压幅值。

若节点 i 处安装有分布式新能源、储电设备、柔性负荷等, 则其净注入有功功率和无功功率可表示为

$$\begin{cases} P'_i = P'_{i, \text{L}} - P'_{i, \text{DG}} + P'_{i, \text{CH}} - P'_{i, \text{DH}} + P'_{i, \text{SOP}} + P'_{i, \text{FL}} \\ \forall i \in N_{\text{DG}}, N_{\text{ESS}}, N_{\text{SOP}}, N_{\text{FL}} \\ Q'_i = Q'_{i, \text{L}} - Q'_{i, \text{DG}} + Q'_{i, \text{SOP}} \\ \forall m \in N_{\text{DG}}, N_{\text{SOP}} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $P'_{i, \text{CH}}$ 、 $P'_{i, \text{DH}}$ 分别为时刻 t 节点 i 处的储能充电功率和放电功率; $P'_{i, \text{DG}}$ 、 $Q'_{i, \text{DG}}$ 分别为时刻 t 节点 i 处的分布式新能源的有功功率和无功功率; $P'_{i, \text{FL}}$ 为时刻 t 节点 i 处接入的电能替代负荷; $P'_{i, \text{SOP}}$ 、 $Q'_{i, \text{SOP}}$ 分别为时刻 t 节点 i 处的智能软开关传输功率。

(2) 储能装置安全运行约束

储能系统 (energy storage system, ESS) 放电时可充当电源的角色, 充电时可充当负荷的角色, 具备灵活的双向调节能力, 是新型配电系统的重要组成部分。储电设备安全运行约束具体如下所示^[12-14]

$$\begin{cases} E_{i,ESS}^t + P_{i,ch}^t \eta_{ch} \Delta t - \frac{P_{i,dh}^t}{\eta_{dh}} \Delta t = E_{i,ESS}^{t+1} & t = 1, 2, \dots, T-1 \\ 0 \leq P_{i,ch}^t \leq P_{i,ch}^{\max} D_{i,ch}^t \\ 0 \leq P_{i,dh}^t \leq P_{i,dh}^{\max} D_{i,dh}^t \\ D_{i,ch}^t + D_{i,dh}^t \leq 1 \\ E_{i,ESS,min} \leq E_{i,ESS}^t \leq E_{i,ESS,max} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $E_{i,ESS}^t$ 为 t 时刻第 i 节点上所连接的 ESS 的电量; $P_{i,ch}^t$ 、 $P_{i,dh}^t$ 分别为相应的 ESS 的充电功率和放电功率; η_{ch} 、 η_{dh} 分别为充放电效率; Δt 为调度时间间隔; $P_{i,ch}^{\max}$ 、 $P_{i,dh}^{\max}$ 分别为 ESS 的充放电功率上限; $E_{i,ESS,min}$ 、 $E_{i,ESS,max}$ 分别为 ESS 电量上下限。考虑到任一时刻 ESS 的充放电不能同时进行, $D_{i,ch}^t$ 、 $D_{i,dh}^t$ 分别为表征 ESS 充放电状态的 0-1 变量。

(3) 智能软开关

智能软开关(soft open point, SOP)是安装于传统联络开关处的电力电子装置。相比于传统的开关, SOP 能够对两条馈线之间传输的有功功率进行控制, 并提供一定的电压无功支持。其有功功率约束和容量约束为

$$\begin{cases} P_{i,t}^{sop}(s) + P_{j,t}^{sop}(s) + P_{ij,t}^{sop}(s) = 0 \\ P_{ij,t}^{sop}(s) = A_{i,sop} |P_{i,t}^{sop}(s)| + A_{j,sop} |P_{j,t}^{sop}(s)| \\ \sqrt{P_{i,t}^{sop}(s)^2 + Q_{i,t}^{sop}(s)^2} \leq S_{ij,t}^{sop}(s) \\ \sqrt{P_{j,t}^{sop}(s)^2 + Q_{j,t}^{sop}(s)^2} \leq S_{ij,t}^{sop}(s) \end{cases} \quad (17)$$

式中: $P_{i,t}^{sop}(s)$ 、 $P_{j,t}^{sop}(s)$ 分别为时刻 t 节点 i 、节点 j 处智能软开关端口的有功功率; $P_{ij,t}^{sop}(s)$ 为时刻 t 节点 i 、 j 间智能软开关的损耗功率; $A_{i,sop}$ 为 SOP 第 i 个端口的损耗系数; $Q_{i,t}^{sop}(s)$ 、 $Q_{j,t}^{sop}(s)$ 分别为时刻 t 节点 i 、节点 j 处智能软开关端口的无功功率; $S_{ij,t}^{sop}(s)$ 为 SOP 端口最大视在功率。

(4) 分布式能源(distributed generator, DG)运行约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,DG}^t \leq P_{i,DG}^{t,pre} \\ Q_{i,DG}^t = P_{i,DG}^t \tan \varphi \end{cases} \quad (18)$$

式中: $P_{i,DG}^t$ 、 $Q_{i,DG}^t$ 分别为 DG 设置为定功率因数运行模式下的有功功率和无功功率; $P_{i,DG}^{t,pre}$ 为 t 时刻节点 i 上所连接的 DG 的预测功率值。

(5) 备用约束

考虑到分布式能源出力和负荷需求的随机性和波动性, 电力系统需要具备一定的备用容量来保证安全可靠的电力供应, 以满足用户的用电需求

$$\sum_{i \in N_{DG}} P_{i,DG}^t + P_{EX}^t + \sum_{i \in N_{ESS}} (P_{i,dh}^t - P_{i,ch}^t) \geq (1 + \varepsilon\%) \sum_{i \in N_{LDN}} P_i^t \quad (19)$$

式中: $\varepsilon\%$ 为系统备用率。

(6) 配电网安全运行约束

配电网的安全运行约束主要考虑节点电压和支路电流

$$\begin{cases} v_{i,min} \leq v_i^t \leq v_{i,max} \\ |i_{ij,t}| \leq i_{ij,max} \end{cases} \quad (20)$$

式中: v_i^t 为时刻 t 节点 i 处的电压幅值; $i_{ij,t}$ 为时刻 t 支路 ij 的电流幅值; $v_{i,max}$ 、 $v_{i,min}$ 分别为节点 i 处电压幅值的最大、最小值; $i_{ij,max}$ 为支路 ij 电流幅值的最大值。

(7) 可转移负荷约束

考虑到电动私家车用户的行为模式大多为回家后充电, 且充电后较少再次使用, 本文在夜晚至凌晨时段将电动汽车视为可转移负荷。其转移时间约束和转移前后负荷总量不变约束为

$$\begin{cases} y_{i,t}^{in} + y_{i,t}^{out} \leq 1 \\ 0 \leq P_{i,t}^{TRin} \leq y_{i,t}^{in} P_{i,t,max}^{TRin} \\ 0 \leq P_{i,t}^{TRout} \leq y_{i,t}^{out} P_{i,t,max}^{TRout} \\ \sum_t (P_{i,t}^{TRin} + P_{i,t}^{TRout}) = 0 \\ y_{i,t}^{in} + y_{i,t}^{out} \leq 1 \end{cases} \quad (21)$$

式中: $y_{i,t}^{in}$ 、 $y_{i,t}^{out}$ 分别为 i 节点 t 时刻移入和移出负荷状态变量; $P_{i,t}^{TRin}$ 、 $P_{i,t}^{TRout}$ 、 $P_{i,t,max}^{TRin}$ 、 $P_{i,t,max}^{TRout}$ 分别为 i 节点转移到 t 时刻和转移出该时刻负荷功率及其上限。

(8) 可平移负荷约束

许多工业用户具有相对固定的生产流程, 因此具有固定形状的负荷曲线。但该类用户对开始用电时段的选择是灵活的。在实际中, 可以通过对该类用户的负荷曲线进行平移, 在保障用户全天用电量不变的前提下实现错峰, 达到削峰填谷, 缓解电网压力的目的。本文将工业电炉负荷视作可平移负荷, 可平移负荷的约束条件如式(22)所示

$$P_{k,t} = \sum_{\tau=1}^{W_k} P_k(\tau) \alpha_{k,t-\tau+1}^s \quad (22)$$

式中: W_k 为第 k 个可平移负荷的负荷曲线持续时间; $P_k(\tau)$ 为可平移负荷 k 在时刻 τ 的用电量; $\alpha_{k,t-\tau+1}^s$ 为 0-1 变量, 表示第 k 个可平移负荷是否在 $t-\tau+1$ 时刻开始用电。

2.3 配电网负荷承载力优化模型的二阶锥转化

上述潮流约束及 SOP 约束中, 部分约束为非线性模型, 这些约束具有强非凸性, 求解难度大。本文通过采用二阶锥模型对约束进行转化, 将非凸的配电网负荷承载力优化模型转化为混合整数二阶锥规划问题, 以满足锥搜索空间的要求, 提升求解效率。

(1) 潮流等式约束转化

用 l_{ij}^t 和 V_i^t 分别替换潮流约束中节点电压和支路电流的二次项

$$\begin{cases} l_{ij}^t = (i_{ij}^t)^2 \\ V_i^t = (v_i^t)^2 \end{cases} \quad (23)$$

对变量替换后的式(14)作进一步的松弛处理,得到标准的二阶锥形式,如式(24)所示

$$\begin{cases} 2P_{ij}^t \\ 2Q_{ij}^t \\ l_{ij}^t - V_{ij}^t \end{cases} \leq l_{ij}^t + V_{ij}^t \quad (24)$$

(2) SOP约束转化

将SOP约束中的非线性部分转化为二阶锥形式

$$\begin{cases} \begin{cases} P_{i,t}^{\text{sop}} \\ Q_{i,t}^{\text{sop}} \end{cases} \leq S_i^{\text{sop}} \\ \begin{cases} P_{j,t}^{\text{sop}} \\ Q_{j,t}^{\text{sop}} \end{cases} \leq S_j^{\text{sop}} \end{cases} \quad (25)$$

3 算例仿真

3.1 数据设置

本章基于改进的某实际电网141节点配电系统,在不同节点接入典型电能替代负荷,包括电动汽车、温控负荷、蓄热式电锅炉、工业电炉,并接入多种灵活性资源。141节点配电系统如图1所示,负荷需求如图2所示。风电和光伏日预测信息如图3所示。源-网侧灵活性资源详细参数如表1所示,负荷侧灵活性资源详细参数如表2所示。其中,线路2至线路52、线路78至线路98、线路128至线路135作为主干线路选取型号为LGJ-240,其他线路作为支路,选取LGJ-35。线路参数如表3所示^[14]。

本章提出4个不同的场景(场景2—场景5)与原始场景(场景1)进行对比分析,对约束条件进行二阶锥松弛后,在MATLAB中使用YALMIP调用CPLEX求解器对模型求解。

场景1:灵活性资源不参与优化调度。

场景2:仅接入分布式能源风电、光伏,对其进行优化调度。

场景3:在场景2的基础上,加入储能设备,对其进行优化调度。

场景4:在场景3的基础上,加入智能软开关SOP,对其进行优化调度。

场景5:在场景4的基础上,考虑电能替代负荷自身可调节性,对其进行优化调度。

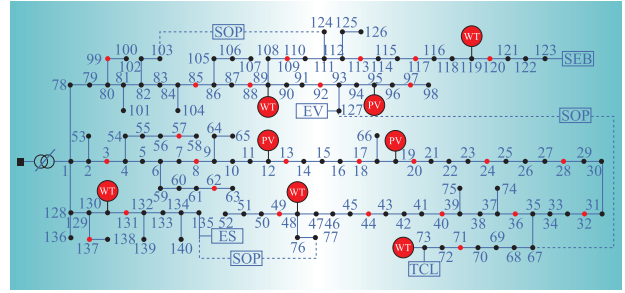


图1 改进141节点配电系统

Fig. 1 Improved 141 node power distribution system

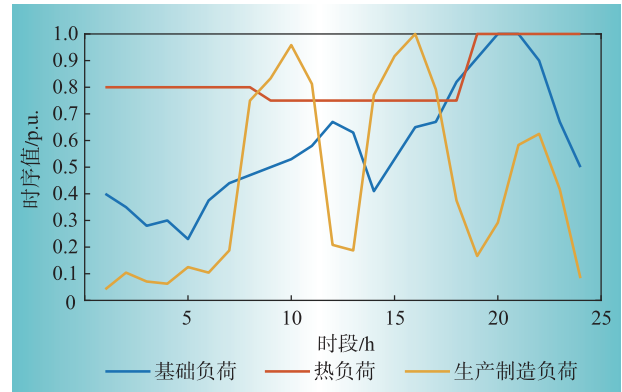


图2 各时段负荷需求

Fig. 2 Load demand in each period

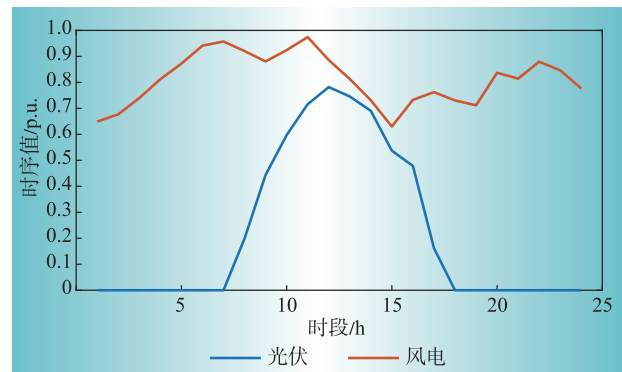


图3 各时段分布式新能源的有功出力比例系数

Fig. 3 Proportional coefficient of active output of distributed new energy in different periods

3.2 仿真结果

场景1下系统所能容纳的最大负荷与其限制因素如表4所示。其中,电动汽车与温控负荷个体功率较小,且温控负荷启停较频繁,因此配电网所能容纳用户较多。工业设备功率较大,且长期工作,因此会对配电网造成较大负荷压力,配电网所能容纳用户较少。场景1下系统与上级电网联络功率如图4所示,可见电能替代下多种负荷与基础负荷叠加,改变了负荷峰谷的分布。同时,电能替代负荷与常规负荷曲线有较大重叠,容易在负荷高峰期造成“峰上加峰”的效果。此外,电能替代负荷的接入,使配电网

表1 源-网侧灵活性资源参数
Table 1 Source-network side flexibility resource parameters

灵活性资源	参数设置
储能设备	额定容量:1.5 MWh
	充放电效率:93%
	最大充电功率:0.2 MW
	最大放电功率:0.3 MW
	SOC限值(p.u.):[0.2, 0.9]
风电	初始SOC(p.u.):0.3
	安装节点:73,123,127,135
光伏	额定容量:0.3 MW
	安装节点:48,73,89,119,130
智能软开关	额定容量:0.2 MW
	安装节点:12,19,95
	传输容量:2 MVA
	损耗系数:0.02
	安装线路:77—135,67—127,103—124

表2 负荷侧参数设置
Table 2 Parameter setting of load side

负荷	参数设置
电动汽车充电桩	行驶里程分布: $Y = \ln X \sim N(3.2, 0.88^2)$ km
	出行时间分布: 日间08:00—17:00占20%, $N(8.9, 1.5^2)$
	夜间17:00—07:00占80%, $N(17.6, 3.4^2)$
	车桩比:2:1
	电池容量:32 kWh
	充电速度:4 kW
	充电效率:90%
	可转移时段:17:00—07:00
	安装节点:127
温控负荷(中央空调)	热阻: $N(2.0, 2)$ °C/kW
	热容: $U(300, 420)$ kJ/°C
	能效比: $U(2.6, 3.4)$
	制冷量:3.5 kW
	温度上下限:[23.5, 24.5] °C
蓄热式电锅炉	安装节点:73
	储、放热功率的上下限:5 kW
	初始蓄热量:0 kW
工业电炉	蓄热容量:20 kWh
	安装节点:123
	功率:120 kW
	转换效率:90%
	可平移时段:00:00—24:00
	安装节点:135

表3 线路参数
Table 3 Line parameters

线路型号	允许持续电流/A
LGJ-35	170
LGJ-240	610

整体电压水平降低,如图5所示。电能替代负荷接入后电压与整体功率的变化,使配电网运行压力增大。

表4 场景1配电网负荷承载力
Table 4 Scenario I distribution network load hosting capacity

负荷	电动汽车充电桩	温控负荷	工业电炉	蓄热式电锅炉
数量	784	817	49	82

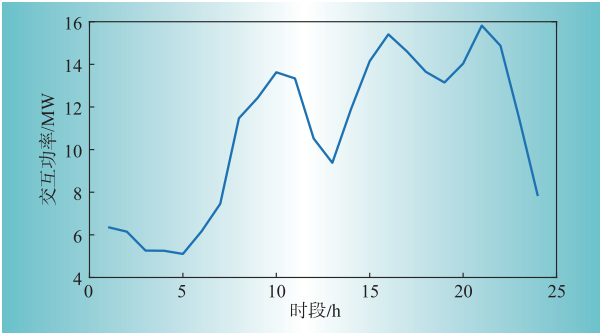


图4 场景1系统与上级电网联络功率
Fig. 4 Power of interconnection between the system and the superior power grid in scenario 1

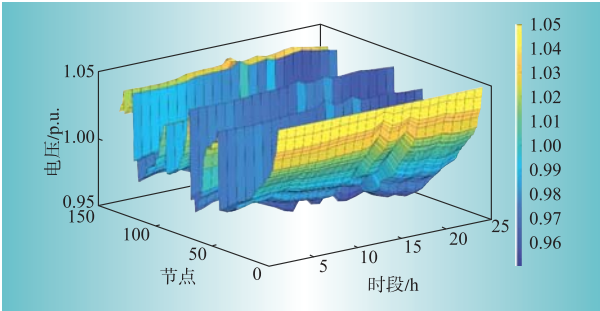


图5 场景1各节点时序电压值
Fig. 5 Sequence voltage values of nodes in scenario 1

接下来对场景2—场景5进行模拟,其可容纳的最大负荷量如表5所示。在场景2加入分布式新能源后,4大类负荷中,配电网对温控负荷和蓄热式电锅炉的承载力得到了较大的改善,对于电动汽车充电桩与工业电炉的改善较小。这与分布式新能源的安装位置和负荷本身特性有关。一方面,温控负荷和蓄热式电锅炉接入节点位于较末端,自身电压水平较低,接入分布式电源后抬高了支路的整体电压,提高了承载力。另一方面,工业电炉本身功率较大,因此用数量表征其承载力提升效果不太显著。

表5 场景2—场景5的负荷承载力
Table 5 Load hosting capacity of scenario 2—5

场景	电动汽车充电桩	温控负荷	工业电炉	蓄热式电锅炉
场景2	784	922	50	130
场景3	877	1 021	51	156
场景4	1 135	1 035	64	219
场景5	1 864	552	65	265

场景3中储能装置充放电功率及SOC优化结果如图6所示。场景3中,对所有负荷所在节点均接入了储能装置,使所有负荷所在节点的负荷承载力都得到了提升。储能装置在负荷低谷期充电,起到负荷的作用,在负荷高峰期放电,起到电源的作用,从而实现了负荷的削峰填谷,对于不同情况下负荷承载力的提升有较广泛的用途。

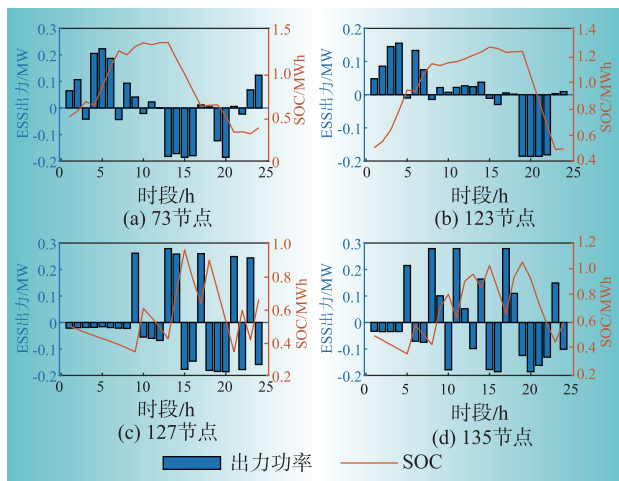


图6 场景3下ESS优化调度结果

Fig. 6 ESS optimal dispatching results under scenario 3

场景4中,SOP各时段传输的有功功率和无功功率如图7所示。SOP能够控制潮流,对配电网进行无功补偿,从而调节配电网的功率分布,降低网络损耗,提高各项指标。通过接入SOP,4个节点的负荷承载力均得到了提高,验证了SOP的作用。同时,SOP端口的接入节点的负荷承载力提升较大,SOP接入的效果较为明显。

场景5中,对负荷进行调控,发挥柔性负荷在配电系统中的调节作用。其中,在13 h至17 h对温控负荷进行温度控制,将它们的设定温度上调1℃。各柔性负荷调节结果如图8—图9所示。从各负荷的调节结果可以看出,负荷调节的关键在于尽量使负荷避开整体负荷的高峰期,将高峰期的负荷转移到低谷期。同时,与场景四相比,接入温控负荷的节点73所能接纳的负荷量从1 035台下降到了552台,而接入电动汽车充电桩的节点127所能接纳的负荷量从1 135个提升到了1 864个。这说明,虽然系统整体的负荷承载力得到了提高,即系统能够接入的负荷数量增多,但对于单个节点来说,其负荷承载力可能出现下降,反映出不同节点之间负荷承载力之间一定的耦合关系。

从节点可容纳的最大负荷数量可以看出,对于不同节点,各灵活性资源的提升效果往往会出现较大差异,其中ESS与SOP的提升效果最为显著。灵活性资源的不同作用要求配电网根据不同节点状

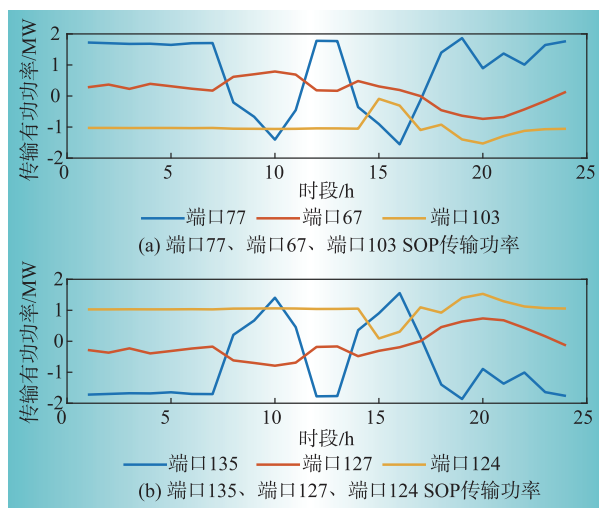


图7 场景4下SOP传输功率

Fig. 7 SOP transmission power under scenario 4

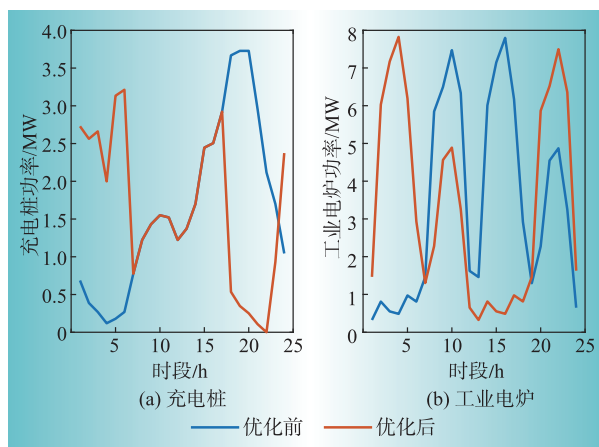


图8 电动汽车和工业电炉功率曲线

Fig. 8 Power curves of electric vehicle and industrial electric furnace

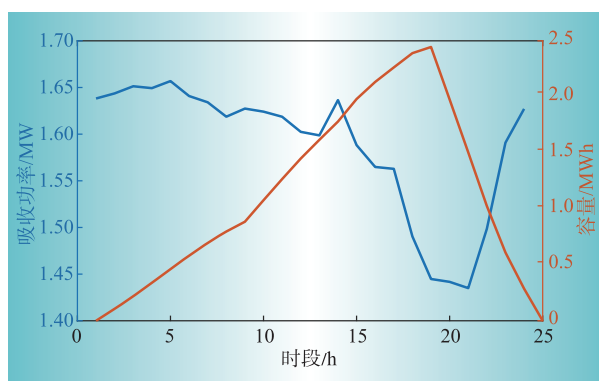


图9 蓄热式电锅炉蓄热功率曲线

Fig. 9 Heat storage power curve of storage electric boiler

态与负荷特点,选取合理的灵活性资源配置,从而最大程度提升配电网负荷承载力。此外,充分挖掘负荷自身的调节能力对于提高配电网负荷承载力也有着重要的意义。通过电网对负荷的优化调度,使配电网可容纳的负荷数量得到了显著提升。

4 结束语

本文针对电能替代加速下新型配电系统对柔性负荷的承载力,从源-荷-网-储出发,建立多种柔性负荷和灵活可控资源的运行模型;在此基础上,以系统容纳负荷数量最大为目标函数,考虑多个约束,建立了配电网负荷承载力优化模型。算例结果表明,通过调度源-网-储侧的灵活性资源,配电网对电能替代负荷承载力得到了明显的提升,且根据灵活性资源的位置、负荷自身特点,承载力提升效果有所不同。同时,对于电能替代背景下的柔性负荷,通过挖掘其调节潜力,减小负荷峰谷差,对提升配电网负荷承载力也具有良好的效果。D

参考文献:

- [1] CHEN Y, XU J, WANG J, et al. Configuration optimization and selection of a photovoltaic-gas integrated energy system considering renewable energy penetration in power grid [J]. Energy Conversion and Management, 2022, 254, 96-99.
- [2] 卫志农,裴蕾,陈胜,等.高比例新能源交直流混合配电网优化运行与安全分析研究综述[J].电力自动化设备,2021,41(9):85-94.
WEI Zhinong, PEI Lei, CHEN Sheng, et al. Summary of research on optimal operation and safety analysis of high proportion new energy ac/dc hybrid distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9):85-94.
- [3] 张笑弟,高强,潘弘.“双碳”目标下新型配电系统功能形态及规划体系[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(5):96-101.
ZHANG Xiaodi, GAO Qiang, PAN Hong. Functional form and planning system of new distribution system under the target of “double carbon” [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(5):96-101.
- [4] 左琦,贺海磊,梁才浩,等.计及有序充电的电动汽车接纳能力量化评估方法[J].电力系统及其自动化学报,2017,29(6):1-6.
ZUO Qi, HE Hailei, LIANG Caihao, et al. Quantitative evaluation method for acceptance capacity of electric vehicles considering orderly charging [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(6):1-6.
- [5] 曲大鹏,范晋衡,刘琦颖,等.考虑配电网综合运行风险的充电桩接纳能力评估与优化[J].电力系统保护与控制,2022,50(3):131-139.
QU Dapeng, FAN Jinheng, LIU Qiyang, et al. Evaluation and optimization of charging pile acceptance capability considering distribution network integrated operation risk [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3), 131-139.
- [6] SALDARRIAGA S D. Evaluation of distributed generation and electric vehicles hosting capacity in islanded DC grids considering EV uncertainty [J]. Energies, 2022, 15.
- [7] 屈高强,王诚良,靳盘龙,等.新型负荷及分布式电源接入配网承载能力综合评估[J].电测与仪表,2019,56(19):37-45,113.
QU Gaoqiang, WANG Chengliang, JIN Panlong, et al. Comprehensive evaluation of load carrying capacity of new type load and distributed generation connected to distribution network [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(19):37-45, 113.
- [8] 李宏仲,汪瑶,胡哲晟,等.双碳背景下配电网对多元接入体的承载能力评估[J].电网技术,2021,16(21):1-12.
LI Hongzhong, WANG Yao, HU Zhesheng, et al. Evaluation of the carrying capacity of distribution network to multiple access entities under the dual carbon background [J]. Power System Technology, 2021, 16(21):1-12.
- [9] 符杨,孟祥浩,苏向敬,等.考虑逆变器无功支撑和三相选择的不平衡主动配电网电动汽车有序充电控制[J].电力自动化设备,2020,40(12):1-7.
FU Yang, MENG Xianghao, SU Xiangjing, et al. Ordered charging control of electric vehicles with unbalanced active distribution network considering inverter reactive power support and three-phase selection [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12):1-7.
- [10] 李潇,刘文颖,朱丽萍,等.蓄热电锅炉参与受阻风电消纳的源荷优化控制方法[J].华北电力大学学报(自然科学版),2021,48(4):31-39.
LI Xiao, LIU Wenying, ZHU Liping, et al. Optimal control method of source load for thermal storage boiler participating in obstructed wind power consumption [J]. Journal of North China Electric Power University, 2021, 48(4):31-39.
- [11] 孙明杰.汽车模具铸件生产车间电炉的选择[J].中国铸造装备与技术,2019,54(5):43-45.
SUN Mingjie. Selection of electric furnace in automobile die casting workshop [J]. China Foundry Machinery & Technology, 2019, 54(5):43-45.
- [12] 詹红霞,肖竣文,邓小勇,等.计及柔性负荷的高比例风光渗透下配电网孤岛划分策略[J].电力工程技术,2022,41(4):108-116.
ZHAN Hongxia, XIAO Junwen, DENG Xiaoyong, et al. Islanding strategy for distribution network with high proportion of wind/photovoltaic penetration considering flexible load [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4):108-116.
- [13] 张孝军,林湘宁,吴宇奇,等.兼顾微配网运行经济性与可靠性的智能软开关选址优化[J].电力系统自动化,2021,45(8):138-145.
ZHANG Xiaojun, LIN Xiangning, WU Yuqi, et al. Optimization of intelligent soft switch location considering operation economy and reliability of micro distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8):138-145.
- [14] 刘自发,于普洋,高建宇,等.考虑电能替代效果的综合能源系统效益评价方法研究[J].供用电,2022,39(5):3-12.
LIU Zifa, YU Puyang, GAO Jianyu, et al. Research on the evaluation method of integrated energy system efficiency considering the effect of electric energy substitution [J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(5):3-12.

作者简介:

张铭泽(1985),男,河北邢台人,硕士,高级工程师,研究方向为城市配电网规划;

华晟辉(1995),男,上海人,硕士,工程师,研究方向为城市配电网规划;

李轶立(1984),男,上海人,硕士,高级工程师,研究方向为城市配电网规划。

(责任编辑 张文翰)