

计及综合需求响应的电-热综合能源系统 分布式光伏最大接入容量评估

马红明¹, 刘林青¹, 谢海鹏², 范 辉³, 李士林³, 李梦宇¹, 段子荷¹

(1. 国网河北省电力有限公司营销服务中心,河北 石家庄 050021; 2. 电气设备电力绝缘国家重点实验室(西安交通大学),陕西 西安 710049; 3. 国网河北省电力有限公司,河北 石家庄 050023)

摘要:为提高综合能源系统分布式光伏的接入容量,考虑电、热多元综合需求响应,建立了电-热综合能源系统对分布式光伏的最大接入容量评估模型。首先,建立电-热综合能源系统的稳态数学模型。然后,基于价格型需求响应、激励型需求响应与弹性热负荷响应,建立了包含电力与热力负荷的综合需求响应的模型。最后,以分布式光伏接入容量最大为目标函数,建立了综合能源系统的接入能力评估模型,并通过松弛技术将问题转化为混合整数二阶锥规划问题。IEEE-33与百利岛33节点耦合系统的算例证明了所提方法的有效性。

关键词:综合能源系统;接入能力;综合需求响应;分布式光伏

中图分类号:TM734 文献标志码:A 文章编号:2096-4145(2021)08-0023-08

Maximum Access Capacity Assessment of Distributed Photovoltaic in Integrated Electric-Thermal Energy System Considering Integrated Demand Response

MA Hongming¹, LIU Linqing¹, XIE Haipeng², FAN Hui³, LI Shilin³, LI Mengyu¹, DUAN Zihe¹

(1. State Grid Hebei Electric Power Marketing Center, Shijiazhuang 050021, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. State Grid Hebei Electric Power Co. Ltd., Shijiazhuang 050023, China)

Abstract: In order to increase the accessed capacity of distributed photovoltaic in integrated energy system, maximum access capacity assessment model of distributed photovoltaic in electric-thermal integrated energy system (IES) is established considering electric-thermal integrated demand response. Firstly, steady mathematical model of electric-thermal IES is established. Then, the integrated demand response (IDR) involving electrical and thermal load is modeled based on the principle of price, incentive and flexible demand response. Finally, taking the maximum PV hosting capacity as the objective function, the access capacity model for IES is established. The relaxation technique is used to transform the problem into mixed integer second-order cone programming problem. The effectiveness of the proposed evaluation method is proved by the IEEE-33 and Barry island 33-node coupling system.

Key words: integrated energy system; access capacity; integrated demand response; distributed photovoltaic

0 引言

综合能源系统是在能源供给、传输与消费中包含多种能源形式的系统,是促进能源的高效利用、

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977168)、国网河北省电力有限公司科技资助项目(SGHEDK00YJS1900305)

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (51977168); Science and Technology Project of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd(SGHEDK00YJS1900305)

实现可持续发展的有效途径。园区级小型综合能源系统直接面向负荷,是保证系统供能质量的关键环节。近年来,随着大规模分布式能源的接入,系统的新能源渗透率不断提高,在提高运行清洁性与经济性的同时,也给系统带来支路潮流越限、电压质量下降优化控制难度变大等诸多不利影响,为系统的安全经济运行带来挑战。

为评估新能源接入容量,国内外学者进行了众多研究。文献[1]基于恒电流模型,以新能源临界最大注入容量分析了配电网的承载能力。文献[2]采

用偏增量分析法对不同类型的配电系统对新能源的消纳能力进行分析。文献[3]基于混合整数非线性规划问题,分析了新能源的最优接入位置与最大渗透率。文献[4]考虑了节点电压和线路载流的约束,并建立了新能源最大注入容量与注入位置间的关系。文献[5]考虑了光伏电源不同功率因数下的运行情况,建立了各节点最优可接入方案。文献[6]基于二步算法将分布式新能源最大接入容量模型线性化,提高了模型的求解难度。文献[7]通过粒子群算法同时完成光伏寻址与接入容量的最优化,提高了问题的求解效率。文献[8]基于灰色关联方法与层次分析法,分析了新能源的接入对配电网的正负综合效应。文献[9]通过构建系统电压改善程度与有功损耗改善程度2个指标评价了分布式发电的接入对系统的影响程度。文献[10]利用鲁棒多目标优化建立了新能源出力波动下的优化调度方法。文献[11]考虑了分布式新能源的不确定性,通过蒙特卡罗模拟的方法得到配电网的随机安全校核方法。文献[12]证明有载调压变压器抽头位置的调整可以快速调节系统电压水平,从而有效预防新能源带来的过电压问题。文献[13]采用极限场景法,利用无功优化提高了配电网对分布式新能源随机性的应对能力。文献[14]基于随机生产模拟,提出了新能源消纳能力的承载方法。文献[15]通过配电网的分区消纳策略实现了分布式新能源的就地消纳,提高了系统的接入能力。文献[16]通过主动配电网的静态重构方法有效遏制了功率倒送所带来的电压抬升问题,进一步提高了光伏接入容量。

然而,这些研究多从单一电网的角度展开研究,由于综合能源系统中的能源形式具有较强的耦合特性^[17],系统的新能源接入容量可望进一步提高。此外,这些研究多从供给侧角度进行分析,认为用户负荷是不变的常量。通过在用户侧推行综合需求响应,调度者可以根据系统的实时平衡情况,通过市场手段引导用户改变负荷需求,从而充分提升用户参与新能源消纳的潜力,进一步提高系统的新能源接入容量。

本文在已有基础上,提出了多种综合需求响应形式参与综合能源系统调度运行的具体策略、方式与模型,并以电-热综合能源系统为主要研究主体,建立了分布式光伏最大接入容量的评估模型。

1 电-热综合能源系统模型

电-热综合能源系统中,电力网络与热力网络

独立运行,并由耦合元件连接。本节分别对电网、热网与元件建立相应的模型,并耦合建立系统的稳态数学模型。

1.1 电网模型

面向用户的电网的拓扑结构多为配电网辐射型拓扑,其结构示意图如图1所示。

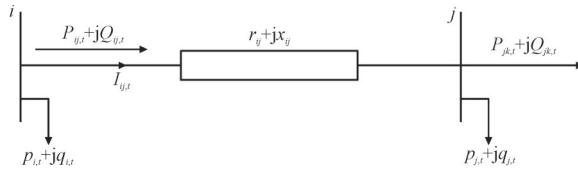


图1 配电网拓扑结构

Fig.1 Topology of distribution network

由此可得电网支路潮流满足以下约束:

$$U_{j,t}^2 = U_{i,t}^2 - 2(r_{ij}P_{ij,t} + x_{ij}Q_{ij,t}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)I_{ij,t}^2 \quad (1)$$

$$P_{j,t} = P_{ij,t} - r_{ij}I_{ij,t}^2 - \sum_{k:j \rightarrow k} P_{jk,t} \quad (2)$$

$$Q_{j,t} = Q_{ij,t} - x_{ij}I_{ij,t}^2 - \sum_{k:j \rightarrow k} Q_{jk,t} \quad (3)$$

$$I_{ij,t}^2 = \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{U_{i,t}^2} \quad (4)$$

式中: i, j 为节点编号; $U_{i,t}$ 与 $U_{j,t}$ 为节点*i, j*的电压; $p_{i,t}, q_{i,t}, p_{j,t}, q_{j,t}$ 分别为节点*i, j*的有功与无功注入功率; $P_{ij,t}, Q_{ij,t}, P_{jk,t}, Q_{jk,t}$ 分别为支路 ij 与 jk 首端的有功与无功功率; $r_{ij}+jx_{ij}$ 为支路 ij 的阻抗; $I_{ij,t}$ 为支路 ij 的电流。

为保证系统的安全运行,电力传输线的容量满足以下约束:

$$|I_i| \leq I_i^{\max} \quad (5)$$

式中: I_i 为线路*i*的电流; I_i^{\max} 为线路*i*承载的最大电流。

为了保证系统节点电压在合理的范围内,有节点电压约束如下:

$$U_i^{\min} \leq U_{i,t} \leq U_i^{\max} \quad (6)$$

式中: U_i^{\min} 与 U_i^{\max} 分别为节点*i*的最小与最大电压。

1.2 热网模型

热力网络由热源、热网与热负荷构成。变量包括节点温度和管道水流量,我国常用质调节的形式对热网进行控制,即不改变管道水流量,通过改变节点温度达到热能供应。在质调节下,模型被简化为描述温度与热量分布的热力网络^[18]。

此时节点的热量交换可表示为:

$$\Phi_{i,t} = C_p m_i^q (T_s^{i,t} - T_o^{i,t}) \quad (7)$$

式中: $\Phi_{i,t}$ 为节点*i*在*t*时刻吸收或释放的热量; m_i^q 为节点*i*的水流量; C_p 为水的比热容; $T_s^{i,t}$ 与 $T_o^{i,t}$ 分

别为节点*i*的供水温度与出水温度。

考虑到热网与外界环境的热交换与热损失,管道温度降落可表示为:

$$T_{f,t}^{\text{end}} = (T_{f,t}^{\text{start}} - T_t^{\text{a}}) e^{-\frac{\lambda L}{c_p m_f}} + T_t^{\text{a}} \quad (8)$$

式中: $T_{f,t}^{\text{start}}$ 与 $T_{f,t}^{\text{end}}$ 为管道*f*首端与末端的水流温度; T_t^{a} 为*t*时刻的外界环境温度; λ 为管道的热损系数;*L*为管道的长度。

在各节点处,不同温度的水流混合,其温度变化为:

$$\sum(m_{\text{in}} T_{\text{in}}) = (\sum m_{\text{out}}) T_{\text{out}} \quad (9)$$

式中: m_{in} 与 T_{in} 为流入该管道的水流量与水温; m_{out} 与 T_{out} 为流出该管道的水流量与水温。

1.3 元件模型

系统中的主要耦合元件为供给侧的热电联产机组与需求侧的热泵^[19]。

在小型电-热综合能源系统中,热电联产机组通常由燃气轮机与蒸汽轮机构成。其出力约束为:

$$c_{\min} \leq P_{i,t}/\Phi_{i,t} \leq c_{\max} \quad (10)$$

$$P_i^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_i^{\max} \quad (11)$$

$$\Phi_i^{\min} \leq \Phi_{i,t} \leq \Phi_i^{\max} \quad (12)$$

$$-r_{\text{down}} \Delta T \leq P_{i,t+1} - P_{i,t} \leq r_{\text{up}} \Delta T \quad (13)$$

式中: c_{\min} 与 c_{\max} 分别为机组变热电比的上下限; $P_{i,t}$ 与 $\Phi_{i,t}$ 为机组*i*在*t*时刻的电、热出力; P_i^{\min} 与 P_i^{\max} 及 Φ_i^{\min} 与 Φ_i^{\max} 分别为机组功率限制; r_{down} 与 r_{up} 分别为机组的最大向下、向上爬坡速率。

热泵可以将电能在用户侧转化为热能。其输入电能与输出热能之间可表示为:

$$\Phi_{\text{hp}} = \alpha_{\text{COP},t} P_{\text{hp}} \quad (14)$$

$$0 \leq P_{\text{hp}} \leq P_{\text{hp}}^{\max} \quad (15)$$

式中: P_{hp} 为热泵输入的电功率; Φ_{hp} 为输出的热功率; $\alpha_{\text{COP},t}$ 为*t*时刻的电热转换比率,与热泵本身性能和温差有关,可由厂家手册查得。

2 综合需求响应模型

综合需求响应是综合能源系统中特殊的需求侧管理形式。综合需求响应不仅关注用户对能源需求的削减与平移,更聚焦于用户侧多种能源形式的相互转换与替代。由于能源替代对用户的用能习惯改变较小,具有更大的可调度能力^[20]。在电-热综合能源系统中,综合需求响应可以分为电力需求响应、热力需求响应与电热转换需求响应。

2.1 电力需求响应

在电力系统中,根据需求响应的策略可以分为价格型需求响应与激励型需求响应。

对于价格型需求响应,售电公司可以通过调整售电价格,引导用户增加或减少用电量。由于电能的商品属性,用户对电量的需求与电价呈现一定的逆向相关性,可以表示为:

$$P_{i,t} = \omega_{i,t} c_t^s + \lambda_{i,t} \quad (16)$$

$$\omega_{i,t} < 0, \lambda_{i,t} > 0$$

式中: $P_{i,t}$ 为用户*i*在*t*时刻的用户的负荷; c_t^s 为*t*时刻的电价; $\omega_{i,t}$ 与 $\lambda_{i,t}$ 为用户*i*在*t*时刻的价格弹性系数^[21]。

激励型需求响应是指出现短期负荷调整需求时,售电公司通过激励信号,或者负荷控制合约,诱导或者控制用户负荷,并给予用户一定的经济补偿。激励型需求响应给予调度者相对快速与确定的调度手段,可以有效解决短期供需不平衡问题^[22-23]。

根据用户负荷的重要程度与运行原理可以分为刚性负荷、可平移负荷与可削减负荷。刚性负荷是指用户不参与激励型需求响应的电力负荷。可平移负荷指的是使用时间可以发生改变的负荷。可削减负荷指的是可以部分或全部切除的负荷。

基于上述分析,可以得到激励型需求响应的模型如下:

$$P_{i,t}^{\text{load}} = P_{i,t}^{\text{BL}} + P_{i,t}^{\text{SL}} + P_{i,t}^{\text{CL}} \quad (17)$$

$$P_{i,t}^{\min} \leq P_{i,t}^{\text{load}} \leq P_{i,t}^{\max} \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^T P_{i,t}^{\text{SL}} = P_{i,sum}^{\text{SL}} \quad (19)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{CL}} \leq P_{i,t}^{\text{CLMAX}} \quad (20)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{load}}$, $P_{i,t}^{\text{BL}}$, $P_{i,t}^{\text{SL}}$, $P_{i,t}^{\text{CL}}$ 分别为用户*i*在*t*时刻的实际负荷,刚性负荷、可平移负荷与可削减负荷; $P_{i,t}^{\min}$ 与 $P_{i,t}^{\max}$ 分别为用户*i*在*t*时刻的负荷限制; $P_{i,sum}^{\text{SL}}$ 为用户*i*可平移负荷的总和; $P_{i,t}^{\text{CLMAX}}$ 为用户*i*可削减负荷的最大值。

在实际调度过程中,售电公司首先提前释放下一时段的电价信号,引导用户参与下一时间段的价格型需求响应,通过市场因素调控用户的需求。若价格型需求响应没有达到既定的控制目标,或由于新能源出力的波动导致进一步负荷调整的需求时,再通过直接负荷控制手段,促使用户参与激励型需求响应。因此通常激励型需求响应以价格型需求响应作为先决条件进行。

2.2 热力需求响应

在供热过程中,由于热能的传递需要一定时

间,室内温度的变化相对于热力供应的变化通常较为滞后。此外,由于用户对温度的感受较为模糊,室内小幅温度波动不会对用户体感造成显著影响。这两者都导致热力负荷的控制往往具有较大调整空间^[24]。

通常,室内的热力需求与外界环境温度有一定关系。用户的热力需求可以用式(21)量化:

$$\Phi_{i,t} = H_i V_i (T_{i,t}^n - T_t^a) \quad (21)$$

式中: $\Phi_{i,t}^h$ 为用户*i*在*t*时刻的热需求; H_i 为建筑的体积热指数; V_i 为建筑体积; $T_{i,t}^n$ 为用户*i*的室内温度。

室内的温度变化满足热力学方程:

$$\rho_c C_{\text{air}} V_i \frac{dT_{i,t}^n}{dt} = \Phi_{i,t} - \Phi_{i,t}^h \quad (22)$$

式中: ρ_c 与 C_{air} 分别为空气的密度与比热容。

此时可以通过调整热能供应,保证用户的室内温度在规定的温度上下限内,此时各个时刻的供热量即使与预定的供热计划差距较大也能满足用户的热力需求,从而实现热负荷的柔性响应。

2.3 电热转换需求响应

电热转换需求响应是综合能源系统中的需求响应多能互补特点的集中体现。通过供给侧的耦合元件将不同类型的能源进行转换。用户可以通过采用不同的能源转换策略以适应自身的能源习惯,并改变不同负荷的对外需求表现。在电-热综合能源系统中,可以通过在需求侧安装热泵的形式实现电能向热能的转换。电热转换需求响应通常需要以价格型需求响应作为实现方式,通过改变不同能源的价格,用户采用能源替代将比直接使用对应能源更为经济,实现用户与系统的激励相容。

3 系统光伏最大接入容量评估方法

随着分布式光伏大规模接入系统,系统的运行安全遭到巨大的挑战。当接入大量分布式光伏时,将导致线路潮流过大,节点电压越过上限等问题,危及系统的安全稳定运行。因此需要合理评估系统对分布式光伏的接入容量。

3.1 接入容量评估模型

光伏最大接入容量指的是在满足系统安全运行的条件下可以接入分布式光伏的最大容量。即:

$$C_s = \max \sum_{i=1}^N P_i^{\text{PV}} \quad (23)$$

式中: C_s 为系统的光伏最大接入容量; P_i^{PV} 为节点*i*

的分布式光伏接入容量。

节点配置分布式光伏的规模受到投资成本、地理环境、政策影响等多种限制,导致不同节点的光伏可配置容量上限不尽相同。其约束式(24)所示:

$$0 \leq P_i^{\text{PV}} \leq P_i^{\text{PVMAX}} \quad (24)$$

式中: P_i^{PVMAX} 为节点*i*可安装的分布式光伏的最大值。

由于实施综合需求响应需要付出一定的经济成本,盲目引导用户参与响应以提高新能源接入是不合理的。而是应当保证光伏接入为售电公司带来的经济收益大于售电公司为推行综合需求响应支出的成本。即:

$$V_s \geq Z_{\text{EDR}} + Z_{\text{CDR}} \quad (25)$$

式中: V_s 为调度者的收益; Z_{EDR} 为电力需求响应的成本; Z_{CDR} 为电热转换需求响应的成本。热力需求响应由于弹性较大,对用户的用能影响较小,因此不需要进行补偿。

分布式光伏的接入可以降低系统的购能成本。因此为售电公司带来的收益为:

$$V_s = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N c_t^b P_i^{\text{PV}} \quad (26)$$

式中: c_t^b 为*t*时刻系统从外界电网购电与内部分布式新能源发电的成本差。

电力需求响应的成本主要包括2部分,分别为价格型需求响应导致的收入差及实施激励型需求响应需要向用户支付的补偿:

$$Z_{\text{EDR}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [c_t^s P_{i,t} - c_0^s P_{i,t}^{\text{ex}} + c_{\text{DR}} |P_{i,t}^{\text{load}} - P_{i,t}|] \quad (27)$$

式中: c_t^s 与 c_0^s 分别为采用与不采用价格型响应时的电价水平; $P_{i,t}$ 与 $P_{i,t}^{\text{ex}}$ 分别为采用与不采用价格型需求响应时的负荷水平; c_{DR} 为激励型需求响应的补偿系数。

电热转换需求响应的成本主要为热泵的运行成本为:

$$Z_{\text{CDR}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N c_{\text{hp}} P_{\text{hp}} \quad (28)$$

式中: c_{hp} 为热泵的运行维护成本。

3.2 接入容量求解方法

由目标函数式(23)与约束条件式(1)—式(22),式(24)—式(28)构成1个非线性优化问题,无法采用常规算法进行高效的求解,因此本文基于二阶锥约束与分段线性化方法,对其中的非线性部分进行转换与松弛。

约束式(1)—式(4)具有大量的二次项,通过二

阶锥松弛可以将这一约束转化为二阶锥规划问题^[25]。

首先,引入变量 $\eta_{i,t}$ 与 $\lambda_{ij,t}$:

$$\begin{aligned}\alpha_{i,t} &= U_{i,t}^2 \\ \beta_{ij,t} &= I_{ij,t}^2\end{aligned}\quad (29)$$

由此可以将上述潮流约束转换为:

$$\alpha_{i,t} = \alpha_{i,t} - 2(r_{ij}P_{ij,t} + x_{ij}Q_{ij,t}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)\beta_{ij,t} \quad (30)$$

$$p_{j,t} = P_{ij,t} - r_{ij}\beta_{ij,t} - \sum_{k:j \rightarrow k} P_{jk,t}\beta_{ij,t} \quad (31)$$

$$q_{j,t} = Q_{ij,t} - x_{ij}\beta_{ij,t} - \sum_{k:j \rightarrow k} Q_{jk,t}\beta_{ij,t} \quad (32)$$

$$\beta_{ij,t} = \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{\alpha_{i,t}} \quad (33)$$

$$U_{i,t,\min}^2 \leq \beta_{i,t} \leq U_{i,t,\max}^2 \quad (34)$$

其中,除约束以外,其他约束均变为线性约束。对约束进行二阶锥松弛有:

$$\left\| \begin{array}{l} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ \beta_{ij,t} - \alpha_{i,t} \end{array} \right\|_2 \leq \beta_{ij,t} + \alpha_{i,t} \quad (35)$$

式中: $\|\cdot\|_2$ 为二范数。

考虑到二阶锥松弛方法的原理是将等式形式的约束松弛为不等式形式的约束,会导致最后的结果出现一定的误差。为保证这一误差在可控范围内,可以通过式(36)误差函数进行校验:

$$f_{err} = \beta_{ij,t}\alpha_{i,t} - P_{ij,t}^2 - Q_{ij,t}^2 \quad (36)$$

并认为这一误差函数在一定范围内时,上述二阶锥约束的松弛方法是可行的。

约束条件式(27)为二次函数型约束,可以通过分段线性化方法将该约束转化为混合整数约束。通过引入整数变量,可以将二次函数约束转化为多个线性函数的叠加,降低求解的难度。分段线性化的示意图如图2所示。首先在限定区域内等间距取 NPL 个离散点 c ,并求解每个离散点处的函数值 $Z(c)$ 。

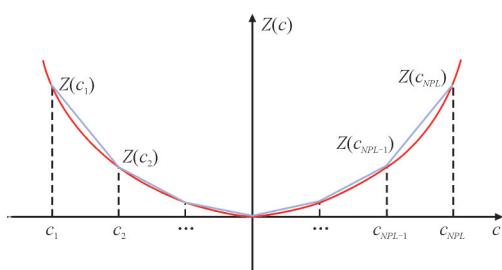


图2 分段线性化原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of piecewise linearization principle

通过引入变量 η 与 δ ,可以将约束条件松弛为多个等式约束的组合:

$$Z(c) = f(c_1) + \sum_{k=1}^{NPL-1} [f(c_{k+1}) - f(c_k)] \cdot \delta_k \quad (37)$$

$$c = c_1 + \sum_{k=1}^{NPL-1} (c_{k+1} - c_k) \cdot \delta_k \quad (38)$$

$$\delta_{k+1} \leq \eta_k, \eta_k \leq \delta_k, \eta_k = \{0, 1\}, k = 1, 2, \dots, NPL - 2 \quad (39)$$

$$0 \leq \delta_k \leq 1, k = 1, 2, \dots, NPL - 1 \quad (40)$$

通过以上转换,可以将原问题转化为以目标函数式(23)与约束条件式(5)—式(22),式(23)—式(40)构成的混合整数二阶锥规划问题(Mixed Integer Second-Order Cone Programming, MISOCP),可以利用 Gurobi, Cplex 等求解器进行求解。

4 算例分析

4.1 算例概述

本文采用 IEEE33 节点-百利岛 33 节点联合系统验证本文所提方法的有效性,模型结构如图3所示。其中,电力节点 7,19,30 装有分布式光伏(简称 PV),节点 6,12,24 装有热电联产机组(简称 CHP)。

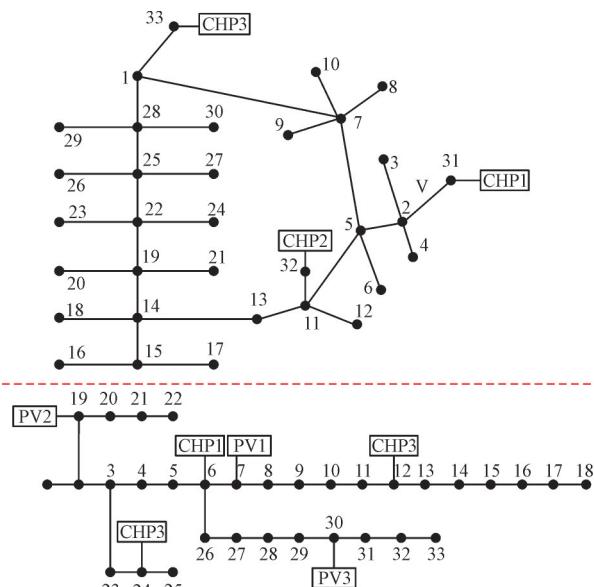


图3 算例示意图

Fig.3 Schematic diagram of case study

负荷预测功率与分布式光伏预测出力如图4所示^[26]。系统的基准电压为 12.66 kV,节点最大与最小电压分别为基准电压的 1.1 与 0.9 倍。实时激励型需求响应中的可平移负荷与可削减负荷分别占总负荷的 25% 与 5%。各热力节点安装有出力上限为 50 kW 的热泵。室内温度上下限分别为 19°C 与 21°C。

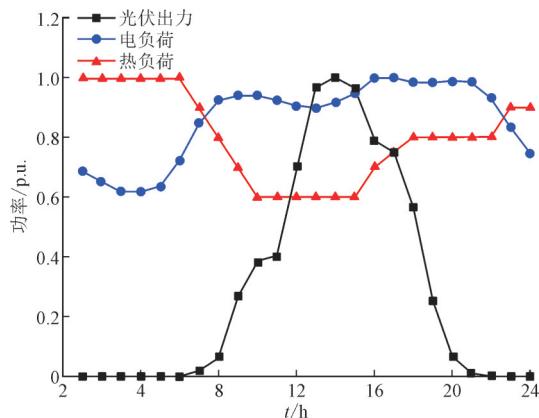


图4 预测负荷与光伏预测出力
Fig.4 Predicted load and distributed PV output

4.2 算例结果

在 Intel® CoreTM i7-9700 CPU 与 16GB RAM 的计算机硬件环境下,采用 Mathworks Matlab2020a 与 IBM CPLEX12.9 求解器对上述问题进行求解,求解时间为 15.873 s。

表 1 为采用综合需求响应前后对应节点的分布式光伏的最大接入容量与系统的最大接入容量。其中,响应前接入容量总计为 4.428 9 MW;响应后接入容量总计为 4.767 8 MW。

表1 综合需求响应前后分布式光伏接入容量
Table 1 Access capacity of distributed PV before and after integrated demand response

接入位置	响应前接入容量	响应后接入容量
节点 7	1.209 0	1.215 7
节点 19	1.384 6	1.654 7
节点 30	1.835 3	1.897 4

随着多元需求响应的加入,所有安装分布式光伏节点的最大接入容量都有一定的上升,整体上升约 7.65%,新增装机占到系统负荷峰值的 8.9%。说明综合需求响应的加入大大加强了系统的光伏接入能力。

接入能力上升的主要原因是需求响应的加入使得负荷由原先的固定量变为可调节的负荷,充分挖掘了负荷侧消纳新能源的潜力。图 5 和图 6 为采用需求响应后电力负荷与热力负荷的变化:

由于需求响应的加入,为尽可能消纳光伏能源,负荷在不同时段呈现不同的上下波动,在正午光伏大发时,一方面调度者通过降低电价与促进负荷平移的形式提升该时段的电力需求;另一方面由于热电机组电热出力的耦合特性,正午的热力负荷相应减少以降低热电机组的出力,从而为光伏的消纳提供了更大的空间。

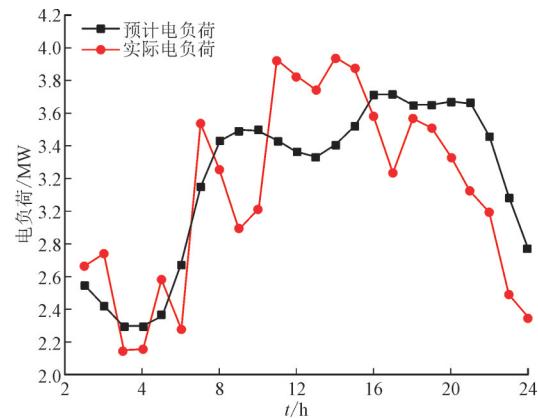


图5 需求响应前后电负荷水平
Fig.5 Electrical load before and after integrated demand response

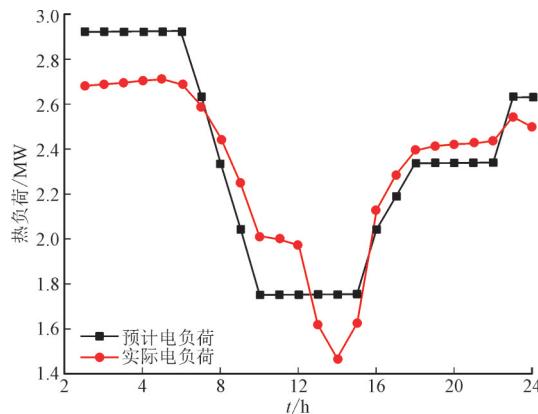


图6 需求响应前后热负荷水平
Fig.6 Heat load before and after integrated demand response

图 7 为电热转换需求响应占供热的比例。从图 7 可知,电热转换需求响应也主要在正午启动以降低热力负荷需求的同时增加电力负荷需求。

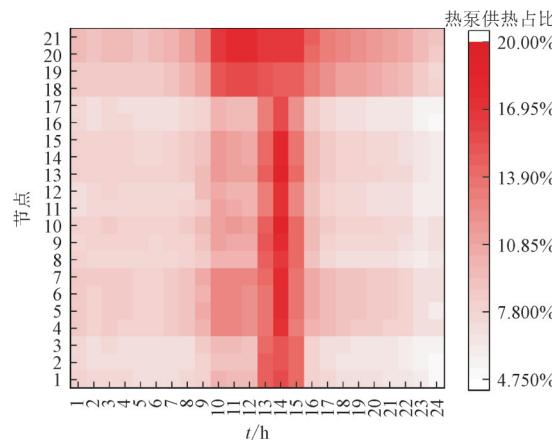


图7 电热转换需求响应占供热的比例
Fig.7 Proportion of electrothermal conversion in heat load

4.3 综合能源系统对接入能力的影响

为验证综合能源系统对系统接入能力的提升

作用,本文设置5种场景进行对比,结果如表2所示。其中,场景1为配电网纯电系统,除光伏外系统内无电源,无需求侧响应;场景2为配电网纯电系统,系统内装有燃气轮机与光伏,燃气轮机安装位置与本文算例中的热点机组位置相同,无需求侧响应;场景3为场景2系统,有需求侧响应;场景4为本文算例中的电-热综合能源系统,无需求侧响应;场景5为场景4系统,有需求侧响应。

表2 不同场景中系统光伏接入容量

Table 2 Accessed PV capacity in different scenarios

接入位置	场景1	场景2	场景3	场景4	场景5	MW
节点7	0.4163	0.9721	1.1214	1.2090	1.2157	
节点19	2.3758	2.0020	1.8629	1.3846	1.6547	
节点30	1.3411	1.5311	1.6305	1.8353	1.8974	

从表5可知,场景1,场景2,场景3,场景4,场景5中系统光伏接入容量总计分别为3.5097 MW,4.5052 MW,4.6148 MW,4.4289 MW,4.7678 MW。

在没有需求侧响应时,综合能源系统接入能力强于普通配电网,但弱于内部存在灵活电源的配电网。这是由于综合能源系统内的热电联产机组出力的耦合特性会限制系统的电出力,从而使得系统的接入能力有所下降。但是存在需求响应时,综合能源系统的接入能力要强于纯电系统,这是由于综合能源系统在负荷侧的强耦合能力不仅可以弥补热电联产机组耦合出力的不足,还可以进一步发挥能源转换的优势,进一步提高系统的新能源接入能力。

4.4 综合需求响应参与情况对接入容量的影响

为验证综合需求响应及其各个组成部分对运行成本的影响,本文如表3所示设置了不同场景,以体现需求响应对接入容量的影响。

表3 不同需求响应参与场景下系统光伏接入容量

Table 3 Accessed PV capacity in different demand response situations

电力需求响应	热力需求响应	电热转换响应	接入容量	MW
不参与	不参与	不参与	4.4289	
参与	不参与	不参与	4.4485	
不参与	参与	不参与	4.6323	
参与	参与	不参与	4.6629	
参与	参与	参与	4.7678	

结果证明,热力需求响应对系统接入能力的提升有着更好效果,而电力需求响应对系统接入能力的提升有限。这是由于即使在光伏出力较高时单

纯增加电力负荷需求,若热力负荷不变,则热电联产机组的出力无法降低,从而导致光伏消纳空间很小。在实际情况下,调度可以根据运行条件与运行政策合理选择不同需求响应的配合情况以达到更高的新能源利用率。

5 结语

本文建立了考虑综合需求响应的电-热综合能源系统光伏最大接入容量评估模型,并通过松弛技术提高了问题的求解效率。所提方法有利于提高园区级小型综合能源系统的光伏接入容量,从而提高了可再生能源的最大接入容量。

算例分析表明,综合需求响应可以促使用户调整负荷以跟踪新能源出力,改变电能与热能负荷的需求曲线;从而有效提升系统对新能源的接入能力。综合能源系统运营商可以通过多元需求响应进一步增加系统的分布式新能源装机容量,从而获得更高的经济收益。

此外,由于热力需求响应与电热转换需求响应可以缓解热电机组“以热定电”的外特性带来的运行约束与调度压力,在提高系统运行灵活性的同时更有利大幅提高系统的新能源最大接入容量。

参考文献

- [1] 王志群,朱守真,周双喜,等.分布式发电接入位置和注入容量限制的研究[J].电力系统及其自动化学报,2005,17(1):53-58.
WANG Zhiqun, ZHU Shouzhen, ZHOU Shuangxi, et al. Study on location and penetration of distributed generations.[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17(1):53-58.
- [2] 黄彦璐.配电网的分布式电源接纳能力分析[D].武汉:华中科技大学,2017.
- [3] RAVIKUMAR V, ZEINELDIN H, XIAO W, et al. Optimal penetration levels for inverter-based distributed generation considering harmonic limits[J]. Electric Power Systems Research, 2013, 97(1):68-75.
- [4] WEN S, GU J, CHENG H Z, et al. Maximum penetration level and optimal placement of distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10): 109-114.
- [5] 翁毅选,程韧俐,马伟哲,等.计及电压波动约束的光伏电源最大可接入容量分析[J].智慧电力,2018,46(11):28-32.
WENG Yixuan, CHENG Renli, MA Weizhe, et al. Maximum integration capacity of distributed photovoltaic power considering voltage fluctuation[J]. Smart Power, 2018, 46(11): 28-32.
- [6] MOHAMMA S A, MA J, ZHANG D, et al. Probabilistic assessment of hosting capacity in radial distribution systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(4):1935-1947.
- [7] 史恒逸,王宝华.考虑配网电压越限风险的光伏接入规划研究[J].电测与仪表,2021, 58(3): 40-46.

- SHI Hengyi, WANG Baohua. Research on PV access planning considering the risk of distribution network voltage overrun[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(3): 40–46.
- [8] 周念成,周颖,池源,等.新能源并网对配电网影响的正负效应综合评估[J].中国电力,2012,45(7):62–67.
- ZHOU Niancheng, ZHOU Ying, CHI Yuan, et al. Comprehensive evaluation of influence of renewable energy generation integration on distribution networks based on positive and negative effect indexes[J]. Electric Power, 2012, 45(7):62–67.
- [9] 陈虎,张田,裴辉明,等.分布式光伏接入对电网电压和网损的影响分析[J].电测与仪表,2015,52(23):63–69.
- CHEN Hu, ZHANG Tian, PEI Huiming, et al. Analysis of distributed photovoltaic power influence on grid voltage and power losses[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52 (23): 63–69.
- [10] 李立鸣,何乐彰,熊宁,等.基于鲁棒多目标优化模型的可再生能源消纳分析[J].智慧电力,2019,47(5):17–24.
- LI Liming, HE Lezhang, XIONG Ning, et al. Renewable energy absorption analysis based on robust multi-objective optimization model[J]. Smart Power, 2019, 47(5):17–24.
- [11] 赵驰,李宏博,傅泽伟.考虑分布式电源不确定性的配电网安全校核方法[J].电力系统及其自动化学报,2016, 28(1): 51–55.
- ZHAO Chi, LI Hongbo, FU Zewei. Security verification method of distribution network considering the uncertainties of distributed generations[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(1): 51–55.
- [12] CHEN X, WU W, ZHANG B. Robust capacity assessment of distributed generation in unbalanced distribution networks incorporating ANM techniques[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(2): 651–663.
- [13] 张艺锴,艾小猛,方家琨,等.基于极限场景的两阶段含分布式电源的配网无功优化[J].电工技术学报,2018,33(2):380–389.
- ZHANG Yipu, AI Xiaomeng, FANG Jiakun, et al. Two-stage reactive power optimization for distribution network with distributed generation based on extreme scenarios[J]. Transactions of China Electrotechnical Society: 2018, 33(2):380–389.
- [14] 刘纯,屈姬贤,石文辉.基于随机生产模拟的新能源消纳能力评估方法[J].中国电机工程学报,2020,40(10):3134–3144.
- LIU Chun, QU Jixian, SHI Wenhui. Evaluating method of ability of accommodating renewable energy based on probabilistic production simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40 (10): 3134–3144.
- [15] 尤毅,余南华,张晓平,等.主动配电网分布式能源分区消纳实时协调控制[J].南方电网技术,2015,9(8):71–76.
- YOU Yi, YU Nanhua, ZHANG Xiaoping, et al. Real-time coordinating control of regional consumption of distributed energy source in active distribution network[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(8):71–76.
- [16] 黄河,朱磊,高松,等.提升分布式电源消纳的配网快速遍历重构方法[J].电力科学与技术学报,2019,34(3):166–172.
- HUANG He, ZHU Lei, GAO Song, et al. Reconfiguration method of distribution system for increasing the penetration of distributed generation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 166–172.
- [17] 张程,刘斯烟,文维,等.多能协同的综合能源系统协调优化控制研究[J].电子设计工程,2020,28(13):9–13.
- ZHANG Cheng, LIU Siyan, WEN Wei, et al. Research on coordinated optimal control of integrated energy system based on multi energy coordination[J]. Electronic Design Engineering, 2020, 28(13): 9–13.
- [18] LIU X, JENKINS N, WU J, et al. Combined analysis of electricity and heat networks[J]. Energy Procedia, 2014, 61(1):155–159.
- [19] 余晓丹,徐宪东,陈硕翼,等.综合能源系统与能源互联网简述[J].电工技术学报,2016, 31(1): 1–13.
- YU Xiaodan, XU Xiandong, CHEN Shuoyi, et al. A brief review to integrated energy system and energy internet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 1–13.
- [20] BAHRAMI A, SHEIKHI A. From demand response in smart grid toward integrated demand response in smart energy hub[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 650–658.
- [21] 张钦,王锡凡,王建学,等.电力市场下需求响应研究综述[J].电力系统自动化, 2008, 32(3): 97–106.
- ZHANG Qin, WANG Xifan, WANG Jianxue, et al. Survey of demand response research in deregulated electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 97–106.
- [22] 王昀,谢海鹏,孙啸天,等.计及激励型综合需求响应的电-热综合能源系统日前经济调度[J].电工技术学报,2021,36(9):1926–1934.
- WANG Yun, XIE Haipeng, SUN Xiaotian, et al. Day-ahead economic dispatch for electricity-heating integrated energy system considering incentive integrated demand response[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(9): 1926–1934.
- [23] 白雪婷,杨瑞琪,陈泽春,等.计及综合需求响应的园区综合能源系统优化运行[J].电力科学与技术学报,2021,36(3):27–35.
- BAI Xueting, YANG Ruiqi, CHEN Zechun, et al. Optimal operation of the park integrated energy system considering integrated demand response[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3):27–35.
- [24] SHAO C, DING Y, WANG J, et al. Modeling and integration of flexible demand in heat and electricity integrated energy system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 361–370.
- [25] 桑丙玉,姚良忠,李明杨,等.基于二阶锥规划的含大规模风电接入的直流电网储能配置[J].电力系统保护与控制,2020,48(5): 86–94.
- SANG Bingyu, YAO Liangzhong, LI Mingyang, et al. Research on energy storage system planning of DC grid with large-scale wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 86–94.
- [26] 高晓松,李更丰,肖遥,等.基于分布鲁棒优化的电-气-热综合能源系统日前经济调度[J].电网技术,2020, 44(6): 2245–2254.
- GAO Xiaosong, LI Gengfeng, XIAO Yao, et al. Day-ahead economical dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system based on distributionally robust optimization[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2245–2254.

(责任编辑 徐秋芳)

收稿日期:2021-06-12; 修改日期:2021-07-29

作者简介:马红明(1982),男,山东聊城人,高级工程师,工学硕士,研究方向为计量技术与数据分析。