

区域综合能源系统接入的配电网扩展规划研究

王一清, 沙倩, 刘秋林

(国网江苏省电力有限公司徐州供电分公司, 江苏 徐州 220005)

摘要:采用目前方法对区域综合能源系统的配电网扩展规划时,忽略分析综合能源系统中各系统的结构和运行特点,导致规划后的配电网污染物排放量高,用电量和用气量高。针对区域综合能源系统,提出配电网扩展规划方法。首先,分析区域综合能源系统结构,构建供热、供冷、供电等模型;然后建立双层优化模型,上层模型的目标为最小化规划总成本,下层模型目标为最大化能源利用率,上、下两层模型分别可扩展规划系统配电网和优化区域综合能源系统。对某个区域综合能源系统接入的配电网的仿真计算结果表明,所提方法规划后的配电网网损率降低至 4%~5%,负载均衡率可达 90% 以上,用电量、用气量以及污染物排放量、负荷功率均得到显著控制。

关键词:区域综合能源系统;配电网;系统模型;扩展规划;网损率

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.06.021 中图分类号: TM721 文章编号: 1673-9140(2023)06-0198-08

Research on distribution network expansion planning for regional integrated energy system access

WANG Yiqing, SHA Qian, LIU Qiulin

(Xuzhou Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Xuzhou 220005, China)

Abstract: The current method used for the expansion planning of the distribution network in a regional integrated energy system overlooks the analysis of the structure and operational characteristics of various systems within the integrated energy system. This oversight results in high pollutant emissions, electricity consumption, and gas consumption in the planned distribution network. Aiming at the regional integrated energy system, a planning method for distribution network expansion is proposed. Firstly, the structure of the regional integrated energy system is analyzed while models for heating, cooling, and power supply are constructed. Next, a two-tier optimization model is established where the upper-level model aims to minimize the overall planning cost, and the lower-level model aims to maximize energy utilization efficiency. The upper and lower-tier models can respectively extend the planning of the system distribution network and optimize the regional integrated energy system. The simulation results of a distribution network connected to a regional integrated energy system show that the proposed method results in a reduction of distribution network loss rate to 4%~5%, the load balancing rate reaching more than 90%, and significantly controlled consumption of electricity, gas, pollutant discharge and load power after planning

Key words: regional integrated energy systems; distribution network; system model; expansion planning; network loss rate

随着环境污染问题的加剧以及不可再生能源的减少,各国加大了对新能源发电技术的研究力

度,并开始将光伏发电和风力发电应用于新能源系统。然而,光伏发电和风力发电方式在运行过程中

收稿日期: 2023-03-30; 修回日期: 2023-11-12

基金项目: 国家电网公司科技攻关项目(GW4020011011X)

通信作者: 刘秋林(1967—),男,硕士,高级工程师,主要从事配电网规划研究; E-mail: monday178@163.com

会产生波动,其不确定性较高,这影响了新能源发电系统在运行过程中的稳定性^[1]。由于人们对发电系统提出了更高的要求,因此对其配电网的扩展规划具有重要的研究意义。

随着可再生能源在能源供应中所占比例不断增加,包括光伏能源和风电能源等,目前大部分可再生能源富集地区存在电源电网建设不同步、输送容量有限和消纳能力差的问题,这些问题会降低可再生能源消纳的比例^[2]。为此,综合能源系统应运而生,能够协调调度多种能源系统,包括供热/冷系统、供电系统和可再生能源系统等。通过协调调度,各类负荷可以实现优化利用。综合能源系统被认为是未来能源系统发展的重要方向。在这一背景下,配电网作为综合能源系统之间的纽带,需要进行扩展规划。

国内相关学者对配电网的扩展规划展开了研究。文献[3]通过适应性指标对配电网中的电气结构和实际状态进行评估,并根据评估结果建立能源系统配电网扩展规划模型。然而,该方法未分析能源系统的运行特点,导致扩展规划后的配电网二氧化碳和二氧化硫排放量较高。文献[4]对配电网的结构进行分析,建立IES模型,并以此为依据建立配电网扩展规划模型,但未分析系统的基本结构,导致扩展规划后的配电网用电量和用气量较高。文献[5]针对包含风力发电、光伏发电等主动配电网规划问题,考虑系统运行风险评估建立优化规划模型。然而,该模型忽略了对能源利用率的考虑,限制了其在实际电网环境中的应用。文献[6]通过将最终用户的投资决策纳入配电网规划的综合模型,采用混合整数二阶锥规划,实现最终用户场所的光伏和电池提供最佳决策。然而,该方法未对配电网结构进行充分分析,限制了在多场景中实现配电网的扩展规划。文献[7]提出了一种两阶段多周期配电网扩展规划方法,通过分层两阶段优化实现对配电网的扩张规划,但未对配电网的电气结构和实际状态进行评估。文献[8]提出了一种配电网多周期重构规划方法,考虑了自动开关对中断持续时间的影响。然而,该方法未考虑能源利用率,导致配电网规划效果不佳。

因此,为解决上述方法中存在的问题,本研究提出了一种区域综合能源系统配电网扩展规划的新方法。为了同时考虑决策者层和供需者层的决

策,将其相互协调起来,实现能源供需平衡和经济效益最大化。通过分析区域综合能源系统结构,建立双层优化模型,上层模型的目标为最小化规划总成本,下层模型目标为最大化能源利用率。上、下两层模型分别可扩展规划系统配电网和优化区域综合能源系统。

1 系统模型

1.1 系统基本结构

通常情况下,区域综合能源系统由电动汽车、变电站、冷热电联供(combined cooling heat and power, CCHP)系统、风电、热电联产(combined heat and power, CHP)机组和光伏等单元构成^[9],系统的基本结构如图1所示。

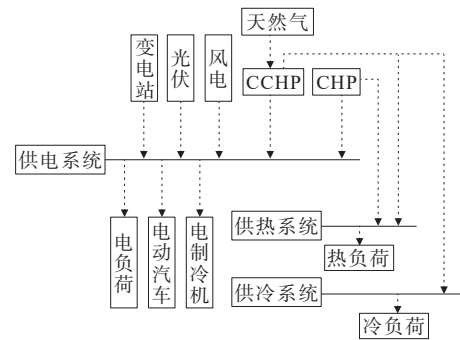


图1 区域综合能源系统基本结构

Figure 1 Basic structure of regional integrated energy system

1.2 供热系统

供热系统在综合能源系统中的过程包括产生热量、传递热量、输送热量和利用热量,由4个部分构成,分别是热用户、热源、热交换站和热网^[10-11]。该系统的运行特点是采用热电联产模式,即通过热泵技术将煤、天然气等燃料转化为热能,以确保及时为用户供热。

区域综合能源系统配电网扩展规划研究方法通过自动回归滑动平均模型^[12]对供热系统在综合能源系统中的惯性进行描述:

$$\begin{cases} T_{h,t} = \sum_{j=1}^J \alpha_j T_{n,t-j} + \sum_{j=0}^J \beta_j T_{g,t-j} + \sum_{j=0}^J \gamma_j T_{w,t-j} \\ T_{n,j} = \theta_1 T_{n,t-1} + \phi_1 T_{g,t-1} + \omega_1 T_{w,t-1} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $T_{h,t}$ 为热网回水温度; J 为热管量对应的大小; $\alpha_j, \beta_j, \gamma_j, \theta_1, \phi_1, \omega_1$ 均为物理参数; $T_{n,t}$ 为采暖建筑室

内温度; $T_{g,t}$ 为热网供水温度; $T_{w,t}$ 为采暖建筑室外温度。

区域的热负荷柔性调节能力符合:根据热负荷需求 $H_{L,t}$ 的柔性,供热系统在时段 t 提供的热量 $H_{G,t}$ 可在一定范围内波动;总供热量在 T' 个时段内与总热负荷需求量相同,即

$$\begin{cases} \mu_1 H_{L,t} \leq H_{G,t} \leq \mu_2 H_{L,t} \\ \sum_{t=n}^{n+T'} H_{G,t} = \sum_{t=n}^{n+T'} H_{L,t} \end{cases} \quad (2)$$

式中, μ_1 为供热弹性的下限值; μ_2 为供热弹性的上限值。

1.3 供冷系统

综合能源系统的供冷系统采用多能互补的运行方式,即在满足用户需求的同时,也提供电、热等多种能源,通过调节制冷设备的运行模式和运行参数,实现供冷。区域综合能源系统配电网扩展规划研究方法通过等值热参数模型^[13]对供冷系统在区域综合能源系统中的惯性进行描述:

$$\begin{aligned} \tilde{T}_{n,t} &= \\ \tilde{T}_{w,t} - Q_{L,t} D - e^{-\frac{\Delta t}{DC}} [\tilde{T}_{w,t} - Q_{L,t} D - \tilde{T}_{n,t-1}] \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $\tilde{T}_{n,t}$ 、 $\tilde{T}_{w,t}$ 分别为室内和室外温度; $Q_{L,t}$ 为时段 t 制冷机在系统中对应的制冷功率; D 为等效热阻; Δt 为时间间隔; C 为等效热容。

1.4 供电系统

1) 光伏电池模型。

环境温度和太阳光照强度决定了光伏电池在供电系统中的输出功率^[14-15],光伏电池模型的温度在通常情况下波动较小,因此只考虑光照强度对光伏电池输出功率产生的影响。通过贝塔分布对几个小时内的太阳光照强度进行计算,密度函数的表达式为

$$f(z) = \frac{(z-a)^{\alpha-1} (b-z)^{\beta-1}}{(b-a)^{\alpha+\beta-1}} \quad (4)$$

式中, z 为光照强度; a 为光照强度在一段时间内的下限值; b 为光照强度在一段时间内的上限值。

光伏电池板在供热系统中的输出功率 P_{PV} 可通过光照强度计算得到:

$$P_{PV} = A_{PV} \lambda \eta_{MPPT} \cos \theta \eta_{PV} \quad (5)$$

式中, A_{PV} 为光伏电池板对应的实际面积; λ 为太阳辐射; η_{MPPT} 为跟踪效率; θ 为太阳入射角; η_{PV} 为光伏电池在供电系统中的效率。

2) 风电机组模型。

风速和输出功率都会对风能资源产生影响,通过下式计算风电出力:

$$P_{WT} = \begin{cases} 0, & v < v_{in} \text{ or } v > v_{out} \\ P_{WT}^0 \frac{v - v_{in}}{v - v_{in}}, & v_{in} \leq v \leq v_0 \\ P_{WT}^0, & v_0 \leq v \leq v_{out} \end{cases} \quad (6)$$

式中, v_0 为风电机组对应的额定风速; v_{in} 为切入风速; v 为实际风速; P_{WT}^0 为额定功率; v_{out} 为切出风速。

3) 充电负荷模型。

EV 充电负荷在不同时间区域间的不同功能区中可以描述为虚拟储能,通过下述公式描述其约束:

$$\begin{cases} E_{r,t+1} = E_{r,t} + \eta_{ch} P_{ch,r,t} \Delta t \\ \alpha_{r,k}^{\min} E_{r,k}^{av} \leq E_{r,t} \leq \alpha_{r,k}^{\max} E_{r,k}^{av} \\ P_{ch,r,t}^{\min} \leq P_{ch,r,t} \leq P_{ch,r,t}^{\max} \\ (1-\lambda) \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T \eta_{ch} P_{ch,r,t}^0 \Delta t \leq \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T \eta_{ch} P_{ch,r,t} \leq \\ (1+\lambda) \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T \eta_{ch} P_{ch,r,t}^0 \Delta t \end{cases} \quad (7)$$

式中, $P_{ch,r,t}$ 为 EV 的充电功率; $E_{r,t}$ 为 EV 在 t 时刻 r 区域中的充电电量; η_{ch} 为 EV 对应的充电效率; $\alpha_{r,k}^{\min}$ 为充电系数下限值; $E_{r,k}^{av}$ 为第 k 个时间区间内 EV 在 r 区域中的平均充电电量; $\alpha_{r,k}^{\max}$ 为充电系数上限值; $P_{ch,r,t}^{\min}$ 为充电功率下限值; λ 为大于零的充电需求系数; $P_{ch,r,t}^{\max}$ 为充电功率上限值; R 为功能区的数量; $P_{ch,r,t}^0$ 为 EV 的预测充电功率; T 为调度时段的数量。

2 配电网扩展规划

根据上述建立的系统模型,对系统的运行特点进行分析,并以此为依据,建立扩展规划模型。

2.1 上层模型

为了在配电网扩展规划中兼顾经济性和安全性,需要考虑配电网扩展规划的经济性^[16],同时确保足够的能源供应和电力系统的运行安全。因此,以新建线路长度、电缆容量、购买电力比例与数量作为决策变量。其中,新建线路长度可扩大配电网的覆盖范围,减少输电损耗,提高供电可靠性。电缆容量决定了扩展后配电网的输电能力和电能传输效率,通过调整电缆容量的大小,可以避免过载

和电能供需不平衡的问题,从而优化成本,提高配电网的能源利用率。考虑购买电力的比例和数量是为了满足增长需求或夜间低负荷时段的能量供应,以确保配电网的安全性和可靠性。

根据以上设定的决策变量,设 C_1 代表新建线路成本, C_M 为维护成本, C_{IM} 为购电成本, C_D 为报废成本。为了定量地描述其与成本之间的关系,从而可以在扩展规划中进行优化和决策,两者之间关系的数学表达式为

$$\begin{cases} C_1 = Lk_1 \\ C_M = k_M LV \\ C_{IM} = k_{IM} PQ \\ C_D = k_D LV \end{cases} \quad (8)$$

式中, k_1 为单位长度的线路成本; L 为线路长度; k_M 为单位长度和容量的维护成本; V 为电缆容量; k_{IM} 为单位电力比例和数量的购电成本, P 为购买电力比例; Q 为购买电力数量; k_D 为单位长度和容量的报废成本。

利用设定的决策变量与各成本之间的关系,以最小化规划总成本为目标,构建的上层模型为

$$\min f_1 = C_1 + C_P + C_M + C_F + C_{IM} - C_E - C_D \quad (9)$$

式中, f_1 为配电网扩展规划对应的等年值; C_P 为年网损成本; C_F 为年故障成本; C_E 为新能源发电后配电网每年减少的成本。

配电网在扩展规划后需要保障其安全性^[17],因此在上层模型中,需要保障配电网在运行过程中的安全性,用 $P_{e,s,t,i}$ 描述节点 i 在系统中的有功功率;用 $U_{e,s,t,i}$ 、 $U_{e,s,t,j}$ 描述节点 i,j 在系统运行过程中的电压幅值;用 $Q_{e,s,t,i}$ 描述节点 i 在系统中的无功功率;用 θ_{ij} 描述节点 i,j 在系统中产生的电压相角差,上层模型的约束条件如下:

$$\begin{cases} P_{e,s,t,i} = U_{e,s,t,i} \sum_{j \in i} U_{e,s,t,j} (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{e,s,t,i} = U_{e,s,t,i} \sum_{j \in i} U_{e,s,t,j} (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ U_{e,i}^{\min} \leq U_{e,s,t,i} \leq U_{e,i}^{\max} \\ S_{e,s,t,ij} \leq S_{e,ij}^{\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中, G_{ij} 为节点 i,j 之间存在的电导; B_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间存在的电纳; $U_{e,i}^{\min}$ 为最小节点电压幅值; $U_{e,i}^{\max}$ 为节点 i 的最大电压幅值; $S_{e,s,t,ij}$ 为支路 ij 对应的容量; $S_{e,ij}^{\max}$ 为支路 ij 在系统运行过程中的传输容

量极值。

2.2 下层模型

为了在区域综合能源系统与配电网扩展规划中优化能源利用,提高系统的能源利用效率。以电力供给、可再生能源的发电功率、电负荷和冷负荷作为下层模型的决策变量,通过调整电力供给的分配,可以在满足电负荷和冷负荷需求的前提下,最大化能源利用率,调整可再生能源的发电功率,可以使其尽可能接近理想出力值,从而最大化可再生能源的利用率。设 N_t 为总时段数, $L_{e,s,t}$ 为区域综合能源系统内部的电负荷, $L_{h,s,t}$ 为区域综合能源系统内部的冷负荷, $P_{e,s,t}^{\text{in}}$ 为系统内第 j 个节点所需的电量值, $P_{e,s,t}^{\text{WT}}$ 、 $P_{e,s,t}^{\text{WT},0}$ 分别为系统PV在第 i 个节点中对应的实际发电功率和理想出力值,下层模型的表达式如下:

$$\max f_2 = \frac{\sum_{t=1}^{N_t} (L_{e,s,t} + L_{c,s,t} + L_{h,s,t}) T_t}{\sum_{t=1}^{N_t} (P_{e,s,t}^{\text{in}} + P_{e,s,t}^{\text{PV}} + P_{e,s,t}^{\text{WT}} + P_{g,s,t}^{\text{in}}) T_t} + \frac{\sum_{t=1}^{N_t} (P_{e,s,t}^{\text{PV}} + P_{e,s,t}^{\text{WT}}) T_t}{\sum_{t=1}^{N_t} (P_{e,s,t}^{\text{PV},0} + P_{e,s,t}^{\text{WT},0}) T_t} \quad (11)$$

式中, $L_{c,s,t}$ 为系统的热负荷; $P_{e,s,t}^{\text{PV}}$ 、 $P_{e,s,t}^{\text{PV},0}$ 分别为WT在系统第 i 个节点中的实际发电功率和理想出力值。其中,下层模型的约束条件如下。

1) 确保能源供应满足区域的能源需求,包括电力、热能等。

电力供需平衡约束条件为

$$\sum_{t=1}^{N_t} (P_{e,s,t}^{\text{PV}} + P_{e,s,t}^{\text{WT}}) T_t - \sum_{t=1}^{N_t} (P_{e,s,t}^{\text{in}} + P_{g,s,t}^{\text{in}}) T_t = 0 \quad (12)$$

冷能供需平衡约束条件为

$$\sum_{t=1}^{N_t} L_{h,s,t} T_t - \sum_{t=1}^{N_t} L_{c,s,t} T_t = 0 \quad (13)$$

热能供需平衡约束条件为

$$\sum_{t=1}^{N_t} L_{e,s,t} T_t - \sum_{t=1}^{N_t} (P_{e,s,t}^{\text{in}} + P_{g,s,t}^{\text{in}}) T_t = 0 \quad (14)$$

2) 考虑传输网络的容量限制约束条件为

$$\begin{cases} P_{e,s,t}^{\text{WT}} \leq P_{e,s,t}^{\text{WT,max}} \\ P_{e,s,t}^{\text{PV}} \leq P_{e,s,t}^{\text{PV,max}} \\ P_{g,s,t}^{\text{in}} \leq P_{g,s,t}^{\text{in,max}} \end{cases} \quad (15)$$

3) 考虑电力系统的稳定运行,即电力系统负平衡度为0,其约束条件为

$$\sum_{t=1}^{N_t} P_{e,s,t}^{\text{in}} T_t - \sum_{t=1}^{N_t} P_{g,s,t}^{\text{in}} T_t = 0 \quad (16)$$

4) 考虑成本因素,包括设备投资成本、运营成本、维护成本等,以最小化总体系统成本为目标,成本最小化约束条件为

$$f_2 \leq W_{t,\max} \quad (17)$$

其中, $W_{t,\max}$ 为系统总体成本最大值。

在优化运行过程中区域综合能源系统会向天然气管网购气^[18],此时节点气流量会在天然气管网中发生变化,为了保证所有时间段内天然气管网在每种场景下的运行安全,需要对管道流量、节点气压和节点流量进行限制,设 $F_{1,g,s,t,i}$ 为网管中节点 i 注入的流量; $F_{2,g,s,t,i}$ 为节点 i 对应的天然气负荷。

$$\begin{cases} F_{1,g,s,t,i} + \sum_{j \in \text{up},i} F_{g,s,t,j} = F_{2,g,s,t,i} + \sum_{k \in \text{down},i} F_{g,s,t,k} \\ F_{g,s,t,ij} = \gamma_{s,t,ij} K_{ij} \sqrt{\gamma_{s,t,ij} [(U_{g,s,t,i})^2 + (U_{g,s,t,j})^2]} \end{cases} \quad (18)$$

式中, $F_{g,s,t,j}$ 、 $F_{g,s,t,k}$ 分别为节点 j 、 k 对应的流量; K_{ij} 为管道在系统运行过程中的传输系数; $\gamma_{s,t,ij}$ 为气流流向; $U_{g,s,t,i}$ 、 $U_{g,s,t,j}$ 为节点 i 、 j 在系统中的气压幅值。

通过构建的上、下层模型,实现配电网扩展规划,上、下层模型的交互过程如下。

1) 求解上层模型。通过上层模型的优化算法,寻找最佳的能源规划方案,以最小化总成本为目标。在求解过程中,上层模型将确定性变量,如有功率、电压幅值等传递给下层模型,以实现能源资源配置。

2) 求解下层模型。下层模型接收到上层模型传递的变量后,根据这些变量进行求解。下层模型的目标是最大化能源利用率,以在满足上层模型要求的前提下,优化能源资源的利用效率。在求解过程中,下层模型将考虑诸如能源供需平衡、传输网络容量、设备运行约束等约束条件。

利用上层与下层模型的求解得到配电网的扩展规划方案,如线路长度、电缆容量、购买电力比例和数量、电力供给等决策变量的取值。根据模型的求解结果,将满足模型的目标和约束条件的线路设定为扩展规划建设工程中,优先选择关键线路进行扩展规划建设,如架空线路,通过配电网的扩容、改

造或新建的线路,以满足电力供需平衡和能源利用的最优化要求。

3 试验分析

为了验证区域综合能源系统配电网扩展规划研究方法的整体有效性,需要对其进行测试。基于虚拟仿真试验平台进行模拟试验,试验采用的硬件为 Intel 酷睿 i7 6700T,仿真软件为 Matlab2021b,试验采用 IEEE 33 节点系统为测试对象,如图 2 所示。

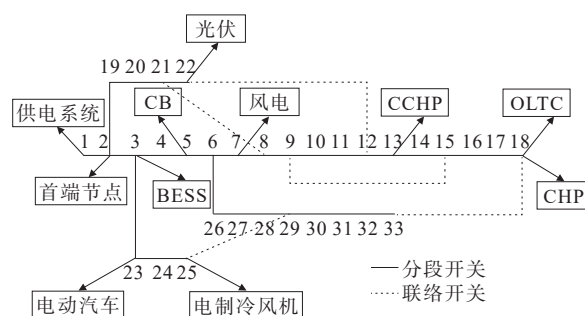


图 2 试验对象

Figure 2 Experimental subjects

为了更好地模拟现实情况下的用电负荷变化,同时可以更加全面地考虑区域综合能源系统的复杂性和多样性和有效提取出各个时段的电力负荷数据和能源利用率,将电网的整体扩展规划分为 5 个时段,每个时段为 24 h,针对这 5 个时段设计以下试验。

接入系统的风电、光伏、CCHP 与 CHP 机组等参数设置如表 1 所示。系统供电电压为 12 kV,基准容量为 10 MV·A,有功功率为 0~2 000 kW,无功功率范围为 0~2 000 kvar,各负荷点功率因数为 0.85,年最大负荷损耗小时数为 2 000 h。图 2 中虚线的配网线路均为待扩展规划的对象。该配电网的总负荷量为 15.8 MV·A。

表 1 接入系统参数设置

Table 1 Access system parameter setting

风电容量/MW	风电出力系数	光伏容量/MW	光伏出力系数	CCHP 容量/MW	CCHP 热效率
100	0.35	50	0.25	80	0.6
CHP 容量/MW	CHP 热效率	BESS 容量/(MW·h)	BESS 充电效率	CB 额定电流/A	OLTC 额定电压/kV
70	0.7	10	0.9	500	10

以图 2 为测试对象,利用模型求解结果,选定其中虚线部分作为待扩展规划配网线路,对其应用研究方法进行扩展规划,对比测试利用本文方法扩展规划电网前后的总成本和能源利用率,结果如图 3、4。

根据图 3、4 的测试结果可知,利用本文方法对电网进行扩展规划后,电网在不同时段的总成本得到明显降低,5 个时段中最高成本仍低于 500 万元,对比规划前的电网成本降低了一倍。本文方法应用后,能源的利用率也得以提升,能源利用率最高可达 50%,这是非常理想的改善效果。

对比扩展规划前后配电网的网损率和负载均衡率,测试结果如图 5、6 所示。

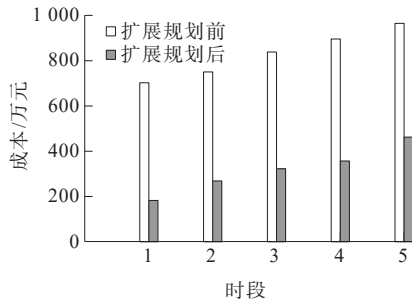


图 3 规划前后电网总成本变化

Figure 3 Changes of total power network costs before and after planning

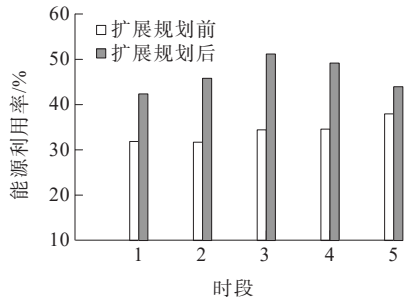


图 4 规划前后能源利用率变化

Figure 4 Energy efficiency changes before and after planning

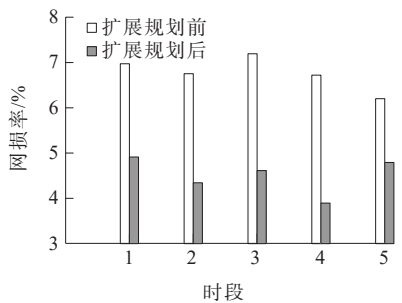


图 5 规划前后网损率变化

Figure 5 Changes of network loss rates before and after planning

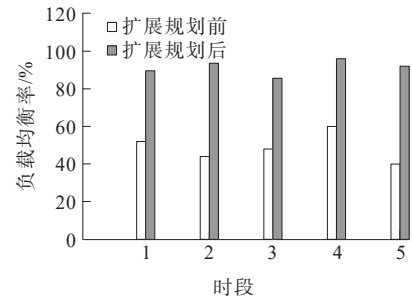


图 6 规划前后负载均衡率变化

Figure 6 Changes of load balancing rates before and after planning

由图 5 可知,通过所提方法对系统进行扩展规划后,网损率较扩展规划前相比,有明显的降低。这是因为在规划过程中,构建上层模型时,充分考虑配电网扩展规划的经济性,最小化规划总成本,合理布置和配置线路,以最小化能量在输电过程中的损耗。网损率的降低可以减少电力系统的损失,从而对能源成本产生积极的影响。相对较低的网损率可以降低供电成本,使得电力供应更加经济高效。

由图 6 可知,与扩展规划前比,扩展规划后的配电网负载均衡率明显升高,表明优化后配电网的性能明显提高,因为该方法在系统配电网优化之前,对各个系统的运行特征进行分析,根据分析结果构建扩展规划模型,提高了所提方法的扩展规划效果。

通过二氧化碳和二氧化硫的排放量验证区域综合能源系统配电网扩展规划研究方法、文献[3]方法和文献[4]方法的有效性,测试结果如图 7、8 所示。

由图 7、8 中的数据可知,与文献[3]方法、文献[4]方法的测试结果相比,本文方法的二氧化碳和二氧化硫排放量较少,表明经所提方法规划后配电网污染物排放量明显降低。

将用电量和用气量作为指标,对比本文方法、文献[3]方法、文献[4]方法规划前后的有效性,测试结果如图 9 所示。

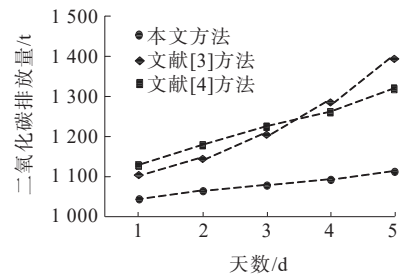


图 7 二氧化碳排放量对比结果

Figure 7 Comparison results of carbon dioxide emissions

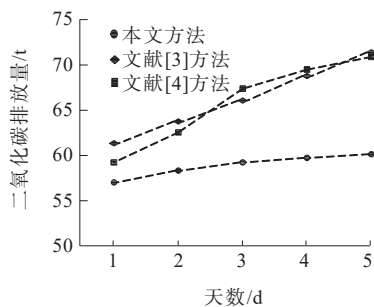


图8 二氧化硫排放量对比结果

Figure 8 Comparison results of sulfur dioxide emissions

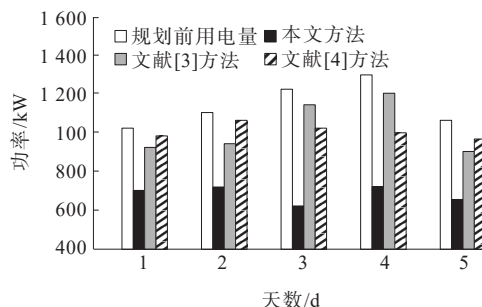
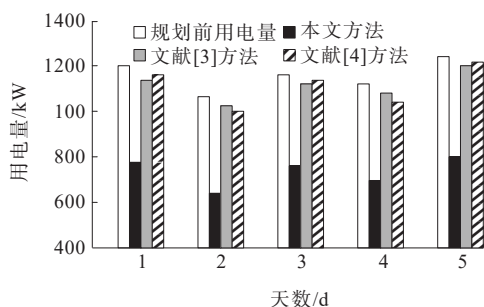
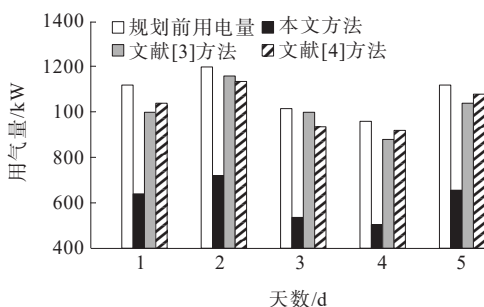


图10 不同方法规划后的负荷功率

Figure 10 Load power after planning by different methods



(a) 用电量测试结果



(b) 用气量测试结果

图9 有效性测试结果

Figure 9 Effectiveness test results

根据图9中的数据可知,与规划前配电网的用电量和用气量相比,本文方法、文献[3]、文献[4]规划后的配电网的用电量和用气量均有所降低,但与本文方法相比,文献[3]方法、文献[4]方法的下降程度较小,验证了本文方法的有效性。

将规划前后的配电网负荷功率作为指标,对比应用本文方法、文献[3]方法、文献[4]方法规划前后的负荷功率变化情况,对比测试结果如图10所示。

由图10的结果可知,与规划前配电网的负荷功率相比,本文方法、文献[3]方法、文献[4]方法规划后的配电网的负荷功率均有所降低。但本文方法相比文献[3]方法、文献[4]方法变化较大,规划后的配电网负荷功率得到了明显降低,进一步验证了所提方法的有效性。

4 结语

目前配电网扩展规划方法存在二氧化碳、二氧化硫排放量大,用电量和用气量高的问题,为了提高整个区域能源系统的供电可靠性,同时降低能源成本和环境污染,提出区域综合能源系统配电网扩展规划研究方法。该方法有效地降低系统的网损率,提高系统的负载均衡率,且降低污染排放量、用电量和用气量,为区域综合能源系统的发展和推广奠定了基础。

参考文献:

- [1] 郑玉平,王俊,杨志宏,等.城镇能源互联网示范应用综述:现状、经验及展望[J].电力系统自动化,2022,46(17):153-166. ZHENG Yuping, WANG Jun, YANG Zhihong, et al. Review on demonstration application of urban energy internet: present situation, experience and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(17): 153-166.
- [2] 蔡颖凯,张冶,曹世龙,等.面向综合需求响应的综合能源系统优化调度[J].电网与清洁能源,2022,38(9):65-72. CAI Yingkai, ZHANG Ye, CAO Shilong, et al. Optimal scheduling of the integrated electricity and natural gas system considering the integrated demand response[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(9): 65-72.
- [3] 王晞,苟竞,苏韵掣,等.基于联合加权熵的高比例可再生能源电网适应性扩展规划[J].电力建设,2019,40(12):45-54. WANG Xi, GOU Jing, SU Yunzhuo, et al. Adaptability expansion planning of grid with high penetration renewable energy applying united weighted entropy theory [J]. Electric Power Construction, 2019, 40(12): 45-54.
- [4] 杜威,刘东,李文云,等.基于配网节点电价的综合能源系统随机优化[J].电力建设,2020,41(12):139-149. DU Wei, LIU Dong, LI Wenyun, et al. Stochastic optimization of integrated energy system based on node

- price of distribution network[J]. Electric Power Construction,2020,41(12):139-149.
- [5] 王健,卢仁军,汪洋.计及风险评估的含分布式发电并网的主动配电网规划方法[J].可再生能源,2020,38(9):1239-1245.
WANG Jian, LU Renjun, WANG Yang. Data monitoring system of stand-alone PV an active distribution network planning method considering risk assessment with distributed generation connection[J]. Renewable Energy Resources,2020,38(9):1239-1245.
- [6] DELARESTAGHI J M, AREFI A, LEDWICH G, et al. A distribution network planning model considering neighborhood energy trading[J]. Electric Power Systems Research,2021,191:106894.
- [7] ASHOORNEZHAD A, FALAGHI H, HAJIZADEH A, et al. A two-stage multi-period distribution network expansion planning considering the integration of private investors[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2021,31(12):13226.
- [8] 高强,刘畅,金道杰,等.考虑综合需求响应的园区综合能源系统优化配置[J].高压电器,2021,57(8):159-168.
GAO Qiang, LIU Chang, JIN Daojie, et al. Optimal configuration of park-level integrated energy system considering integrated demand response[J]. High Voltage Apparatus,2021,57(8):159-168.
- [9] 张超,冯忠楠,邓少平,等.考虑电热混合储能的多能互补协同削峰填谷策略[J].电工技术学报,2021,36(S1):191-199.
ZHANG Chao, FENG Zhongnan, DENG Shaoping, et al. Multi-energy complementary collaborative peak-load shifting strategy based on electro-thermal hybrid energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2021,36(S1):191-199.
- [10] 郑雅迪,张安安,张银,等.计及设备时变性的园区综合能源系统能效模型[J].智慧电力,2022,50(4):103-109.
ZHENG Yadi, ZHANG Anan, ZHANG Yin, et al. Energy efficiency model of park-level integrated energy system considering time variation of equipment[J]. Smart Power, 2022,50(4):103-109.
- [11] 姜涛,张启蒙,蒋振国,等.考虑风电消纳的区域综合能源系统多能互补优化方案对比分析[J].浙江电力,2022,41(11):23-30.
JIANG Tao, ZHANG Qimeng, JIANG Zhenguo, et al. Comparative analysis of multi-energy complementary optimization schemes for regional integrated energy system considering wind power consumption[J]. Zhejiang Electric Power,2022,41(11):23-30.
- [12] 余磊,张永励,袁梦笛,等.基于泛函序列时变自回归滑动平均模型的弹箭时变模态参数递推估计方法[J].兵工学报,2020,41(11):2189-2197.
YU Lei, ZHANG Yongli, YUAN Mengdi, et al. A time-varying modal parameter recursive estimation method based on FS-TARMA model for missile and rocket [J]. Journal of Military Science and Technology, 2020, 41 (11):2189-2197.
- [13] 丁娅鑫,熊军华.基于改进麻雀算法的区域综合能源系统优化研究[J].自动化与仪表,2022,37(10):24-29+34.
DING Yaxin, XIONG Junhua. Research on regional integrated energy system optimization based on improved sparrow algorithm[J]. Automation & Instrumentation, 2022, 37(10):24-29+34.
- [14] 吴忠强,申丹丹,尚梦瑶,等.基于改进蝗虫优化算法的光伏电池模型参数辨识[J].计量学报,2020,41(12):1536-1543.
WU Zhongqiang, SHEN Dandan, SHANG Mengyao, et al. Parameter identification of photovoltaic cell model based on improved grasshopper optimization algorithm[J]. Acta Metrologica Sinica,2020,41(12):1536-1543.
- [15] 彭寒梅,贺玮煜,胡磊,等.含多EH参与的电—气区域综合能源系统多能流收敛性调整[J].湘潭大学学报:自然科学版,2022,44(5):78-91.
PENG Hanmei, HE Weiyu, HU Lei, et al. Multi-energy flow convergence adjustment of electricity-gas regional integrated energy system considering EH participation[J]. Journal of Xiangtan University: Natural Science Edition, 2022,44(5):78-91.
- [16] 姜涛,周慧娟,周炜然,等.基于源荷协同调峰的区域综合能源系统优化调度[J].电器与能效管理技术,2022,64(9):8-17.
JIANG Tao, ZHOU Huijuan, ZHOU Weiran, et al. Optimal dispatch of regional integrated energy system based on source-load coordinated peak load shaving[J]. Electrical Appliances and Energy Efficiency Management Technology,2022,64(9):8-17.
- [17] 孔顺飞,胡志坚,谢仕炜,等.含电动汽车充电站的主动配电网二阶段鲁棒规划模型及其求解方法[J].电工技术学报,2020,35(5):1093-1105.
KONG Shunfei, HU Zhijian, XIE Shiwei, et al. Two-stage robust planning model and its solution algorithm of active distribution network containing electric vehicle charging stations[J]. Journal of Electrotechnical Technology, 2020, 35 (5):1093-1105.
- [18] 蒋明喆,成贵学,赵晋斌.考虑动态荷储策略的综合能源系统双层规划模型[J].电力科学与技术学报,2022,37(5):44-57.
JIANG Mingzhe, CHENG Guixue, ZHAO Jinbin. Double-deck planning model of integrated energy system in consideration of dynamic load energy storage strategy [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022,37(5):44-57.