

考虑综合需求响应的配电网重构运行优化研究

张太升¹,许根利¹,李忠良¹,狄方涛¹,荣家鹏¹,韩彬²,陈涛²,王逸飞²

(1. 国网河南省电力有限公司 焦作供电公司,河南 焦作 454002;

2. 东南大学 电气工程学院,南京 210096)

Research on optimization of distribution reconfiguration operation considering integrated demand response

ZHANG Taisheng¹, XU Genli¹, LI Zhongliang¹, DI Fangtao¹, RONG Jiapeng¹,

HAN Bin², CHEN Tao², WANG Yifei²

(1. Jiaozuo Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Co., Ltd., Jiaozuo 454002, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

摘要:重构运行优化决策灵活性是智能配电网的重要特征之一,随着配网侧多能源形式相互耦合的不断增强,以能量枢纽为代表的综合能源转换装置受到广泛关注。如何在配电网重构优化运行中考虑能量枢纽运行特性,为配电网与用户用能带来更多的灵活性与经济性等相关研究亟待开展。提出了一种考虑综合能源需求响应的配电网重构优化决策模型,将传统的电力用户侧需求响应扩展到多种能源网络用户的综合能源需求响应,将综合能源需求响应与配电网重构优化运行进行协同决策,实现配电网与整体用户整体最优的目标。算例验证了模型算法的有效性。

关键词:配电网重构;综合能源;综合需求响应;能量枢纽;二阶锥规划

Abstract: Flexible optimization of reconfiguration operation is one of the main features in smart distribution systems. As the multi-carrier energy coupling growing, the integrated energy transformation components, such as energy hub, gains increasing concerns. The research is still needed on how to optimize the topology reconfiguration considering integrated demand response such that more flexibility and economics could be achieved. A topology reconfiguration optimization and solution methodology model is presented in distribution systems considering integrated energy demand response. The traditional demand response in power users are extended to multi-energy users. The distribution topology reconfiguration is optimized coordinately with the integrated demand response to realize the global optimum of distribution systems and all users. The case studies verify the effectiveness of the proposed model and algorithm.

Key words: distribution reconfiguration; integrated energy; integrated demand response; energy hub; the second order cone programming

0 引言

随着配网侧各种能源的耦合互联逐渐增强,以能量枢纽(energy hub,EH)为基础的综合能源耦合与跨能源形式的综合需求响应受到学术界与工业界的重视。在传统电力系统中,电能配电网中单向流动,传统的需求响应(demand response,DR)也仅仅局限于电力用户侧,学者们提出了基于价格和激励两种主要的需求响应模式^[1-2]。然而,随着综合能源的日益渗透,使得其他能源网络的用户可以通过能量枢纽节点跨网参与电网侧的需求响应,配网侧的运行模式出现了新的改变^[3-5]。

能量枢纽能够满足客户不同类型的能源需求,比

如电能、天然气、供热和供冷等。不同形式的能源通过耦合基础设施相互连接,如何在配电网与能量枢纽之间进行协同决策,考虑综合能源需求响应实现配电网的最优运行,相关研究尚有待深入开展。

配电系统运行中与能量枢纽的协调主要涉及2个问题,一是能量枢纽内部的综合能源需求响应运行特性,二是考虑综合能源需求响应的配电网最优重构决策。针对第一个问题,在EH运行策略和协调方面,文献[6]提出气电综合能源配网系统最优潮流的凸优化方法,同时在配网系统中引入气电联合需求响应来提高系统调度的可控性和灵活性。文献[7]提出多能源网络与能量枢纽联合规划模型。文献[8]考虑到多种能源形式间耦合性不断增强的趋势,提出一种面向多能源系统的中长期运行模型和方法。文献[9]研究了能量枢纽中日前和实时相协同的能源管理问题,目标是最大化日前的社会福利,并在日内抵消实时负荷变化以及可再生能源波动。

收稿日期:2020-10-12;修回日期:2020-12-08

基金项目:广东省自然科学基金项目(2020A1515011160);
国网河南省电力公司科技项目(5217C020000G)

文献[10]中提出了一种综合能源优化运行方法,考虑风电场、电热存储系统,以及电热的需求响应。文献[11]综合考虑微能源网能耗成本和环境成本,提出一种实时电价模型,并以此建立需求响应模型。文献[12]研究了综合能源系统中的综合需求响应项目,介绍了综合需求响应的基本概念和推广价值。然而,上述研究考虑能量枢纽的最优运行时,并未考虑配电网重构决策对能量枢纽最优运行的影响。

针对第二个问题,文献[13]—文献[15]研究了配电网的重构优化运行。文献[16]提出了一种基于网架结构相似性和适应性的配电网动态重构策略。文献[17]提出了一种含有分布式的主动配电网重构策略。然而,上述研究中并未充分考虑能量枢纽的综合能源需求响应,实现配电网运行决策的协同优化。

本文考虑了能量枢纽的拓扑结构,构建了基于能量枢纽的综合能源需求响应运行特性与约束方程,最终提出了考虑综合能源需求响应的配电网重构运行优化模型与高效求解方法,提出的模型可有效提升配电网与综合能源枢纽的协同灵活性与运行经济性,降低整体运行成本,提高整体运行效益。

1 考虑综合能源需求响应的重构优化模型

图1展示了能量枢纽的拓扑结构图,该能量枢纽由热电联产机组(CHP)、蓄电(ES)、电锅炉(EB)和热存储(HS)组成。热电联产将气体转化为热能和电能。电储能从配电网、CHP等来源获取电能,并在需要时释放电能。CHP获取天然气进行发电,热储能系统储存和CHP产生的热量,在热量需求大的时候释放。

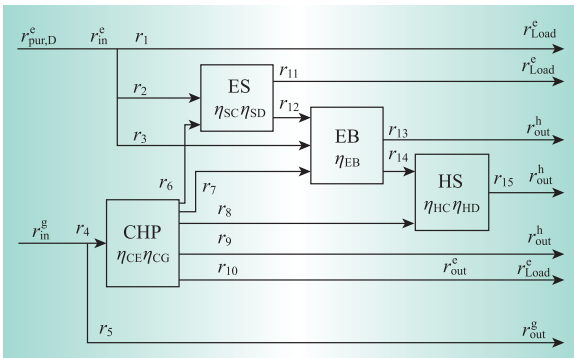


图1 能量枢纽EH拓扑图

Fig.1 EH topology of multi-carrier energy system

在图1中, $r_1, r_2, \dots, r_{15}$ 为EH中的内部能量流; $r_{pur,D}^e$ 为从配电网运营商(distribution system operator, DSO)处购买的电能; r_{in}^g 与 r_{out}^g 分别为EH中天然气的输入和输出量; r_{in}^e 和 r_{out}^e 分别为EH电能的输入和输出量; r_{out}^h 为EH的热能输出量; r_{Load}^e 为EH的电负

荷;CHP中 η_{CE} 和 η_{CG} 分别为将天然气转化为电能和热能的效率; η_{SC} 和 η_{SD} 分别为ES的充电和放电效率; η_{EB} 为在EB中将电能转化为热能的效率; η_{HC} 和 η_{HD} 分别为在HS中充电和放电的效率。

在本文中,假设所有的EH都由配电调控中心管理,运行目标是 minimized 配电网和EH需求响应的总成本,运行决策需要考虑配网重构与综合能源需求响应的整体约束,以实现最大的社会效益。

1.1 EH的最优运行与需求响应

(1) 运行成本

EH_i 表示第 i 个能量枢纽,可以从配电系统购买电力,从燃气供应商购买燃气,以满足负荷需求。其运行成本也包含了购电成本、购气成本以及需求响应成本。 EH_i 的能源成本表示为

$$C_e(M_{pur,e,i}^t) = \sum_{j=1}^{NT} \lambda_{LMP}^t \cdot M_{pur,e,i}^t \quad (1)$$

$$C_g(M_{pur,g,i}^t) = a \cdot M_{pur,g,i}^t + b \cdot M_{pur,g,i}^t + c \quad (2)$$

$$0 \leq M_{pur,e,i}^t \leq M_{pur,e,i}^{\max} \quad (3)$$

$$0 \leq M_{pur,g,i}^t \leq M_{pur,g,i}^{\max} \quad (4)$$

式中: $C_e(M_{pur,e,i}^t)$ 和 $C_g(M_{pur,g,i}^t)$ 为购买电力和天然气的能源成本; NT 为仿真时段; λ_{LMP}^t 为 t 时刻的电力购买价格; a 、 b 、 c 为系数; $M_{pur,e,i}^t$ 和 $M_{pur,g,i}^t$ 分别为 EH_i 在 t 时刻从配电系统买来的能源以及天然气; $M_{pur,e,i}^{\max}$ 和 $M_{pur,g,i}^{\max}$ 分别为 EH_i 在物理容量限制下能够购买的最大功率和天然气量。

EH中的电力负荷大致可分为弹性负荷和非弹性负荷。常见的弹性负荷包括洗衣机、电动汽车、高压空调等,非弹性负荷包括照明、烹饪、冰箱等,本文只考虑综合需求响应中的可削减负载。由于电力负荷需求响应可能会导致用户的不适,因此考虑了每个EH的不适成本。 $L_{e,el,i}^t$ 和 $L_{e,0,i}^t$ 分别为实施DR之前以及之后的负载,应该满足以下条件

$$L_{e,el,i}^{\min} \leq L_{e,el,i}^t \leq L_{e,el,i}^{\max} \quad (5)$$

$$C_{dr}(L_{e,el,i}^t) = \sum_{i=1}^{NT} \alpha (L_{e,el,i}^t - L_{e,0,i}^t)^2 \quad (6)$$

式中: $C_{dr}(L_{e,el,i}^t)$ 为DR的成本; $L_{e,el,i}^{\min}$ 和 $L_{e,el,i}^{\max}$ 分别为调度后的最小和最大负荷,保证实际用电量满足生活需要;系数 α 为每个EH对负载偏差的敏感度。

(2) EH的运行与需求响应约束

式(7)—式(38)对EH运行特性构建约束方程,各变量解释见式(38)后面。

式(7)—式(22)是图1所示的EH变量之间的等式关系,其物理特性本质是能量守恒。

$$r_{l,i}^t + r_{10,i}^t + r_{11,i}^t = r_{out,e,i}^t \quad (7)$$

$$r_{out,e,i}^t = L_{e,el,i}^t + \sum_j M_{sel,e,ij}^t \quad (8)$$

$$L_{e,el,i}^{\min} \leq L_{e,el,i}^t \leq L_{e,el,i}^{\max} \quad (9)$$

$$r_{out,e,i}^t = L_{h,i}^t \quad (10)$$

$$r_{out,g,i}^t = L_{g,i}^t \quad (11)$$

$$r_{5,i}^t = r_{out,g,i}^t \quad (12)$$

$$r_{9,i}^t + r_{13,i}^t + r_{15,i}^t = r_{out,h,i}^t \quad (13)$$

$$r_{1,i}^t + r_{2,i}^t + r_{3,i}^t = r_{in,e,i}^t \quad (14)$$

$$r_{4,i}^t + r_{5,i}^t = r_{in,g,i}^t \quad (15)$$

$$\eta_{HC} \cdot (r_{8,i}^t + r_{14,i}^t) - \eta_{HD} \cdot r_{15,i}^t = \Delta E_{hs,i}^t \quad (16)$$

$$\eta_{SC} \cdot (r_{2,i}^t + r_{6,i}^t) - \eta_{SD} \cdot r_{11,i}^t = \Delta E_{es,i}^t \quad (17)$$

$$\eta_{CE} \cdot r_{4,i}^t - r_{6,i}^t - r_{7,i}^t - r_{10,i}^t = 0 \quad (18)$$

$$\eta_{CG} \cdot r_{4,i}^t - r_{8,i}^t - r_{9,i}^t = 0 \quad (19)$$

$$\eta_{EB} \cdot (r_{3,i}^t + r_{7,i}^t + r_{12,i}^t) - r_{13,i}^t - r_{14,i}^t = 0 \quad (20)$$

$$r_{in,e,i}^t = M_{pur,e,i}^t \quad (21)$$

$$r_{in,g,i}^t = M_{pur,g,i}^t \quad (22)$$

由于提出的EH中的每个分支都给定了能量流方向,因此在式(23)和式(24)中输入能量和能量流变量都是正的。

$$r_{in,e,i}^t, r_{in,g,i}^t \geq 0 \quad \forall i, \forall t \quad (23)$$

$$r_{1,i}^t, r_{2,i}^t, \dots, r_{15,i}^t \geq 0 \quad \forall i, \forall t \quad (24)$$

式(25)和式(26)限制CHP和EB的输入。

$$r_{4,i}^t \leq CHP_i^{\max} \quad \forall i, \forall t \quad (25)$$

$$r_{3,i}^t + r_{7,i}^t + r_{12,i}^t \leq EB_i^{\max} \quad (26)$$

式(27)和式(28)描述热储能的输入、输出和运行模式,热储能不允许同时储存和释放热量。

$$r_{8,i}^t + r_{14,i}^t \leq S_{hs,i}^t \cdot E_{ch,h,i}^{\max} \quad \forall i, \forall t \quad (27)$$

$$r_{15,i}^t \leq (1 - S_{hs,i}^t) \cdot E_{dis,h,i}^{\max} \quad \forall i, \forall t \quad (28)$$

$$0 \leq E_{hs,i}^t \leq E_{hs,i}^{\max} \quad (29)$$

$$E_{hs,i}^t = \begin{cases} E_{hs,i}^0 & \text{if } t=0 \\ E_{hs,i}^{t-1} + \Delta E_{hs,i}^{t-1} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall i \quad (30)$$

式(31)和式(32)限制了电储能的输入、输出和运行模式,式(33)和式(34)限制了电储能的容量,电储能不允许同时充电和放电。

$$r_{2,i}^t + r_{6,i}^t \leq S_{es,i}^t \cdot E_{ch,e,i}^{\max} \quad \forall i, \forall t \quad (31)$$

$$r_{11,i}^t + r_{12,i}^t \leq (1 - S_{es,i}^t) \cdot E_{dis,e,i}^{\max} \quad \forall i, \forall t \quad (32)$$

$$0 \leq E_{es,i}^t \leq E_{es,i}^{\max} \quad (33)$$

$$E_{es,i}^t = \begin{cases} E_{es,i}^0 & \text{if } t=0 \\ E_{es,i}^{t-1} + \Delta E_{es,i}^{t-1} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall i \quad (34)$$

式(35)一式(38)描述了热电联产机组中发电量与供热量的运行特性。

$$r_{6,i}^t + r_{7,i}^t + r_{10,i}^t = \sum_k \mu_{k,i}^t \cdot \nu_{k,i} \quad (35)$$

$$r_{8,i}^t + r_{9,i}^t = \sum_k \mu_{k,i}^t \cdot \omega_{k,i} \quad (36)$$

$$0 \leq \mu_{k,i}^t \leq 1 \quad \forall k, \forall i, \forall t \quad (37)$$

$$\sum_k \mu_{k,i}^t = 1 \quad \forall i, \forall t \quad (38)$$

式中: $r_{1,i}^t, r_{2,i}^t, \dots, r_{15,i}^t$ 为EH中的内部能量流; $r_{in,e,i}^t$ 和 $r_{in,g,i}^t$ 分别为EH中天然气和电能的输入量; $r_{out,g,i}^t$ 、 $r_{out,e,i}^t$ 和 $r_{out,h,i}^t$ 分别为EH中天然气、电能和热量的输出量; $L_{e,dr,i}^t$ 为DR中的甩负荷; $L_{h,i}^t$ 和 $L_{g,i}^t$ 分别为EH中的热负荷和天然气负荷; $\Delta E_{hs,i}^t$ 和 $\Delta E_{es,i}^t$ 分别为HS和ES的能量变化量; $CHP_i^{\max}$ 和 $EB_i^{\max}$ 分别为CHP和EB的最大输入量; $S_{hs,i}^t$ 为HS的状态; $E_{ch,h,i}^{\max}$ 和 $E_{dis,h,i}^{\max}$ 分别为HS充能和放能的最大值; $E_{hs,i}^t$ 和 $E_{hs,i}^{\max}$ 分别为HS的储热量和最大储热量; $E_{es,i}^t$ 和 $E_{es,i}^{\max}$ 分别为ES的储电量和最大储电量; $S_{es,i}^t$ 为ES的状态; $E_{ch,e,i}^{\max}$ 和 $E_{dis,e,i}^{\max}$ 分别为ES充能和放能的最大值; $\nu_{k,i}$ 和 $\omega_{k,i}^t$ 分别为操作区域的边界点; $\mu_{k,i}^t$ 为保证解在特定范围内的系数。

1.2 配电系统重构

配电系统重构型基于二阶锥规划理论,其目标函数是整体用户的用能成本最低,即

$$\min \sum_{i=1}^{NB} \lambda_{LMP}^t P_{in,i} \quad (39)$$

式中: NB 为配电网节点数; λ_{LMP}^t 为 t 时刻电力价格; $P_{in,i}$ 为配网侧变电站节点的注入功率。

式(40)一式(42)限制了配电网的树状结构; ω_l , σ_{mn} 为二进制变量。

$$\omega_l = \sigma_{mn} + \sigma_{nm} \quad \forall l \in L \quad (40)$$

$$\sum_{n \in N(m)} \sigma_{mn} \leq 1 \quad \forall m \in N \quad (41)$$

$$\sigma_{mn} \in \{0, 1\} \quad 0 \leq \omega_l \leq 1, \forall l \in L \quad (42)$$

P_{mn} 和 Q_{mn} 分别为从母线 m 到总线 n 的有功和无功功率流; V_m 、 V_i 、 V_j 分别为节点 m 、 i 、 j 的电压幅值; θ_{ij} 为节点 i 、 j 的电压相角差; u_m^l 为节点 m 相连的线路电压。通过定义辅助变量 $u_m = V_m^2 / \sqrt{2}$, $J_l = V_i V_j \cos \theta_{ij}$, $K_l = V_i V_j \sin \theta_{ij}$, 支路有功和无功潮流约束分别在式(43)和式(44)中线性化。 G_l 和 B_l 分别为母线 m 和 n 之间线路的串联电导和电纳; B_l^h 是母线 m 和 n 之间线路的并联电纳。

$$P_{mn} = \sqrt{2} G_l u_m^l - G_l J_l - B_l K_l \quad \forall l \in L \quad (43)$$

$$Q_{mn} = -\sqrt{2} (B_l + \frac{B_l^h}{2}) u_m^l + B_l J_l - G_l K_l \quad \forall l \in L \quad (44)$$

式(45)表示辅助变量 J_l , K_l 和 u_m^l , u_n^l 的圆锥松弛关系,即

$$J_l^2 + K_l^2 \leq 2 u_m^l u_n^l \quad \forall l \in L \quad (45)$$

式(46)和式(47)将线路重构变量 ω_l 与辅助电压变量 u_m^l 连接起来, $V_{m,\max}$ 和 $V_{m,\min}$ 是母线 m 的最大电压和最小电压。

$$0 \leq u_m^l \leq V_{m,\max}^2 \omega_l / \sqrt{2} \quad \forall m \in N \quad (46)$$

$$0 \leq u_m - u_m^l \leq \frac{V_{m,\max}^2}{\sqrt{2}} (1 - \omega_l) \quad \forall m \in N \quad (47)$$

$I_{l,\max}$ 是电流最大量。通过定义 $A_l = G_l^2 + (B_l + \frac{B_l^{\text{sh}}}{2})^2$,

$$B_l = G_l^2 + B_l^2, C_l = G_l^2 + B_l(B_l + \frac{B_l^{\text{sh}}}{2}), D_l = G_l \cdot \frac{B_l^{\text{sh}}}{2}, \text{式(48)}$$

限制了线容量。

$$\sqrt{2} A_l u_m^l - \sqrt{2} B_l u_n^l - 2 C_l J_l + 2 D_l K_l \leq I_{l,\max}^2 \quad \forall l \in L \quad (48)$$

式(49)一式(51)给出辅助变量 J_l , K_l 以及 u_m 的上下限。

$$0 \leq J_l \leq V_{m,\max} V_{n,\max} \quad \forall l \in L \quad (49)$$

$$-V_{m,\max} V_{n,\max} \leq K_l \leq V_{m,\max} V_{n,\max} \quad \forall l \in L \quad (50)$$

$$\frac{V_{m,\min}^2}{\sqrt{2}} \leq u_m \leq \frac{V_{m,\max}^2}{\sqrt{2}} \quad \forall m \in N \quad (51)$$

1.3 配电网与EH的协同运行

式(39)包含了3个EH的用电负荷与购电成本,所以配电网与EH协同运行的总成本包含了总供电成本式(1)、供气成本式(2)、需求响应的用户不适成本式(6),运行约束包含了式(3)一式(5)、式(7)一式(38)、式(40)一式(51)。对该优化问题进行求解,即可得出配电网与综合能源需求响应的协同运行优化决策,实现资源优化配置。

2 算例分析

为验证本文所提出模型的合理性,构建一个考虑综合能源需求响应的配电网优化决策模型。负荷数据方面,采用美国能源部开放能源信息(open energy information, OpenEI)网站公布的900余个居民用户的电表数据作为负荷需求。此外,给定EH中CHP气转电效率为0.35,气转热效率为0.45;ES的充电效率为0.95,放电效率为0.95;HS的充能效率为0.95,放能效率为0.95;EB的电转热效率为0.9。天然气价格选取2018年9月某天的天然气交易价格,为2.828美元/百万英热单位。CHP的成本系数 a 、 b 、 c 分别定为0.000 4、180、50。

如图2所示,利用IEEE 33节点配电系统验证模

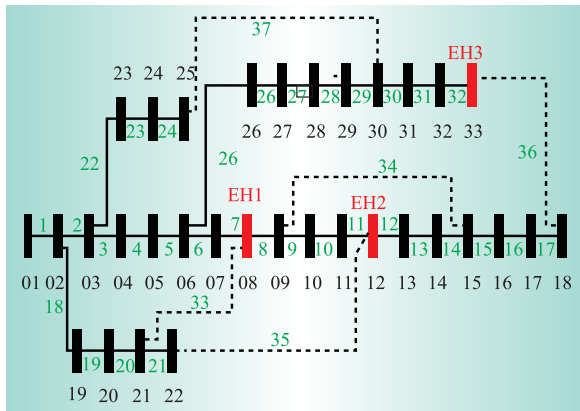


图2 改进型33节点配电系统

Fig. 2 Improved 33 node distribution system

型和算法的有效性。假设3个能量枢纽EH1、EH2和EH3分别位于节点8、12和33。

算例中考虑3种情况。算例1考虑有配电网重构而无需求响应时,配电网总体的运行成本;算例2则是加入综合需求响应后,计算配电网运行成本;为了与算例2作为对比,算例3在加入需求响应的基础上,不考虑配电网重构。所有仿真均在搭载英特尔i5-6500 3.2 GHz CPU和8 GB RAM的Windows 10 64位电脑上运行,仿真平台使用MATLAB 2018a,优化工具使用Yalmip和Gurobi。

2.1 无综合需求响应下的配电网运行

在算例1中,EH的输入端就固定为末端的负荷,这种情况下无需考虑EH内部的能量转化,用于满足末端负荷的能量全部来自于EH从配电网处购买的电能。在只有配电网重构而没有需求响应参与的模型中,该算例就是传统的配电网重构给优化决策,此时系统运行成本为1 166.59美元。

2.2 考虑综合需求响应的配电网重构

在算例2中考虑到DR时,EH可以为负荷管理做出更有效的决策。随着节点边际电价(locational marginal price,LMP)的提高,电力需求响应本需要削减负荷以降低成本,牺牲用户舒适度以改善电力系统运行。加入了综合需求响应之后,当LMP较高时,EH可以利用多种能量形式的相互转化降低用户用电成本,用户也可以从需求响应行为中受益。在这种算例情况下,EH输入端输入的能量,也就是从配电网处购买的电能,并不一定等于末端的负载量。

EH的优势就在于能够灵活的从各个部门进行能量转换。在算例2情景下,EH1中 $r_1 = 41.847$ kW, $r_2 = 6.752$ kW, $r_3 = 17.906$ kW,说明此时EH从配电网处购买部分电能,另一部分选择购买天然气来由CHP转化为电能,以满足末端负荷。ES的输入 r_2 和 r_6 不为0,输出 r_{12} 为0,因此,ES处于蓄能状态。末端热负荷所需热能则由CHP、EB和HS共同提供,各组件发热量见图3,EH购电量与发电量见图4。

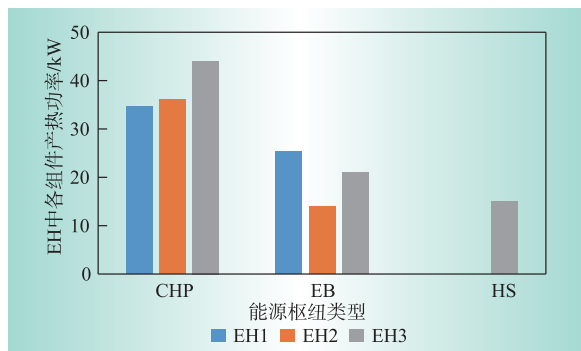


图3 EH中各组件产热功率

Fig. 3 Heat power in EHs' components

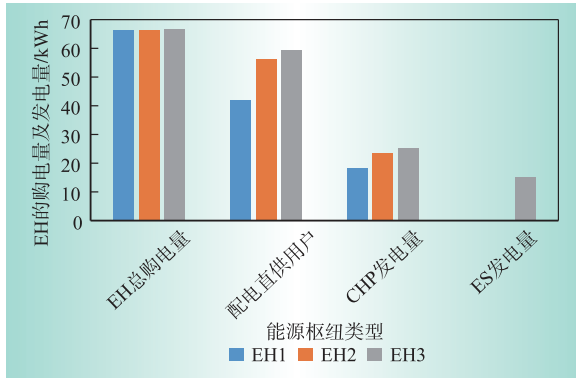


图4 EH中的购电及发电需求

Fig. 4 Power purchase and power generation demand in EH

对于配电网用户来说,整体能量需求成本包括买电成本以及购买天然气成本。EH中天然气可转化为电能,一定程度上使EH的购电量变小,同时要考虑天然气的价格以及天然气转化为电能的效率。在满足用户用电需求量的同时,平衡EH从DSO处的买电量与买气量是取得最小运行成本的关键。EH倾向于在LMP较低的时候储存电能,在LMP较高时排放电能,以降低成本并最大化自身利益。这种考虑需求响应情况下配电网运行的总成本为875.89美元。

在CHP中,天然气能被转化为电能和热能。其中,天然气转化为电能和热能的效率分别为0.35和0.45,此处设定天然气价格为30美元/MW,那么CHP生产1 kWh电能的成本为0.086美元,生产1 kWh热能的成本为0.067美元。如果LMP大于0.086时,EH就不会从DSO买入电能,而是会倾向于通过天然气来生产电能。总之,有了CHP,EH可以更好地进行资源管理,它能够根据LMP的波动情况改变电力资源的分配,电力公司可以有效地节省资金。

2.3 有需求响应而无配电网重构情况

此时EH的电能由DSO,CHP和ES提供,并且它们之间相互独立。在这种情况下,配电网运行成本达到了939.26美元。

配电网重构能够优化小时潮流,进而降低配电系统的配电网运行成本。它通过改变配电网络拓扑结构来提高可靠性,降低线损,均衡负荷和改善供电电压质量。因此可以通过重新配置来降低DSO的成本,尤其是当LMP较高时。DSO的成本是用网络损耗乘以LMP来评估的,这意味着DSO为配电网损耗买单。

从图2可以看出,配电系统中有33个变电站,每两个变电站之间由一条联络线连接,因此,在配电网正常运行时是有32条联络线工作,图2中标号显示为1—32。此外,配电系统中还有33—37号没工作的联络线,这几条线扮演联络开关的角色,在不同情况下断开或连接不同的联络线即配电网重

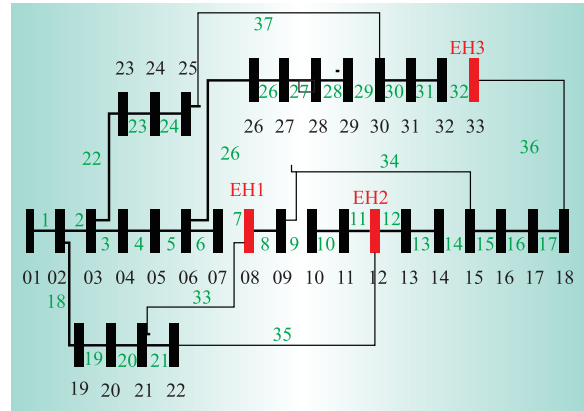


图5 重构后的33节点配电系统

Fig. 5 The reconstructed 33 bus distribution system

构。对比有无配电网重构的配电网运行情况,在无重构时,配电系统中的7、9、12、28以及33号联络线处于断开状态。在有重构时,如图5所示,配电网中7、9、14、29、32号断开联接。

综上所述,3种情景下DSO成本情况如表1所示。当有需求响应时,它将配电网运行成本从无需需求响应的1 166.59美元降低到875.89美元,降幅高达24.9%,可以明显看出加入了综合需求响应的配电网具有更好的经济效益。此外,在有需求响应的基础上,有重构的成本比起无重构的降幅达到了6.7%,效果明显。因此,所提出的模型与算法可以利用多能源耦合的协同优势,降低整体运行成本。

表1 能量枢纽EH运行成本

Table1 Operation cost of EH

算例	注入功率成本	EH购气成本	美元
			总成本
算例1	912.07	254.52	1 166.59
算例2	361.28	514.61	875.89
算例3	406.40	532.86	939.26

3 结束语

本文提出了一种考虑综合能源需求响应的配电网重构优化决策模型,以经济最优性为目标,将配电网重构以及综合能源需求响应进行协同决策。从算例分析来看,以能量枢纽为代表的综合能源系统能够实现各种形式能源的协同优化,考虑综合能源需求响应能够显著改善配电网的经济性与灵活性,降低配电网运行成本。D

参考文献:

- [1] 吴界辰,艾欣.交互能源机制下的电力产消者优化运行[J].电力系统自动化,2020,44(19):1-18.

- WU Jiechen, AI Xin. Optimal operation of electricity producers and consumers under interactive energy mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19):1-18.
- [2] 胡俊杰,王坤宇,艾欣,等.交互能源:实现电力能源系统平衡的有效机制[J].中国电机工程学报,2019,39(4):953-966.
HU Junjie, WANG Kunyu, AI Xin, et al. Interactive energy: an effective mechanism to realize the balance of power energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(4):953-966.
- [3] 龚钢军,杨晟,王慧娟,等.综合能源服务区块链的网络架构、交互模型与信用评价[J].中国电机工程学报,2020,40(18):5 897-5 911.
GONG Gangjun, YANG Sheng, WANG Huijuan, et al. Network architecture, interaction model and credit evaluation of integrated energy service blockchain[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18):5 897-5 911.
- [4] 艾欣,王坤宇,胡俊杰,等.基于交互能源机制的产消者群分布式调度方法研究[J].电网技术,2020,44(5):1 766-1 777.
AI Xin, WANG Kunyu, HU Junjie, et al. Research on distributed dispatching method of consumer group based on interactive energy mechanism[J]. Power System Technology, 2020, 44(5):1 766-1 777.
- [5] 路畅,郭力,刘一欣,等.基于柔性互联的独立微电网分布式优化调度方法[J].电网技术,2019,43(5):1 512-1 519.
LU Chang, GUO Li, LIU Yixin, et al. Distributed optimal dispatching method for independent microgrid based on flexible interconnection[J]. Power System Technology, 2019, 43(5):1 512-1 519.
- [6] 刘天琪,张琪,何川.考虑气电联合需求响应的气电综合能源配网系统协调优化运行[J/OL].中国电机工程学报[2020-10-21].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20200622.1437.003.html>.
LIU Tianqi, ZHANG Qi, HE Chuan. Coordinated and optimal operation of gas power integrated energy distribution network system considering joint demand response of gas and power[J/OL]. Proceedings of the CSEE [2020-10-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20200622.1437.003.html>.
- [7] 黄武靖,张宁,董瑞彪,等.多能源网络与能量枢纽联合规划方法[J].中国电机工程学报,2018,38(18):5 425-5 437.
HUANG Wujing, ZHANG Ning, DONG Ruibiao, et al. Joint planning method of multi energy network and energy hub[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18):5 425-5 437.
- [8] 王雅楠,邵成成,冯陈佳,等.多能源系统中长期协调运行模型与方法[J].电力自动化设备,2020,40(3):55-61,75.
WANG Yanan, SHAO Chengcheng, FENG Chenjia, et al. Medium and long term coordinated operation model and method of multi energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3):55-61, 75.
- [9] 滕云,刘硕,回茜,等.考虑区域多能源系统集群协同优化的联合需求侧响应模型[J].中国电机工程学报,2020,40(22):7 282-7 296.
TENG Yun, LIU Shuo, HUI Qian, et al. Joint demand side response model considering collaborative optimization of regional multi energy system clusters[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22):7 282-7 296.
- [10] 刘方泽,牟龙华,张涛,等.微能源网多能源耦合枢纽的模型搭建与优化[J].电力系统自动化,2018,42(14):91-98.
LIU Fangze, MOU Longhua, ZHANG Tao, et al. Modeling and optimization of multi energy coupling hub in micro energy grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14):91-98.
- [11] 马腾飞,吴俊勇,郝亮亮,等.基于能源集线器的微能源网能量流建模及优化运行分析[J].电网技术,2018,42(1):179-186.
MA Tengfei, WU Junyong, HAO Liangliang, et al. Energy flow modeling and optimal operation analysis of micro energy grid based on energy hub[J]. Power System Technology, 2018, 42(1):179-186.
- [12] 孙伟男,倪靖猛,滕松.综合能源系统中的综合需求响应研究[J].电工技术,2019(22):136-139.
SUN Weinan, NI Jingmeng, TENG Song. Research on integrated demand response in integrated energy system[J]. Electric Engineering, 2019(22):136-139.
- [13] 章博,刘晟源,林振智,等.高比例新能源下考虑需求侧响应和智能软开关的配电网重构[J/OL].电力系统自动化[2020-12-22].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20200515.1111.002.html>.
ZHANG Bo, LIU Shengyuan, LIN Zhenzhi, et al. Distribution network reconfiguration considering demand side response and intelligent soft switching under high proportion of new energy[J/OL]. Automation of Electric Power Systems[2020-12-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20200515.1111.002.html>.
- [14] 李振坤,路群,符杨,等.有源配电网动态重构的状态分裂多目标动态规划算法[J].中国电机工程学报,2019,39(17):5 025-5 036,5 284.
LI Zhenkun, LU Qun, FU Yang, et al. A state splitting multi-objective dynamic programming algorithm for dynamic reconfiguration of active distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(17):5 025-5 036, 5 284.
- [15] 陈永进.基于复杂网络拓扑判别的主动配电网重构优化[J].电气应用,2019,38(12):31-38.
CHEN Yongjin. Active distribution network reconfiguration optimization based on complex network topology discrimination[J]. Electrotechnical Application, 2019, 38(12):31-38.
- [16] 曹昉,张姚,李赛.基于网架结构相似性和适应性的主动配电网动态重构[J].电力系统自动化,2019,43(16):78-86.
CAO Fang, ZHANG Yao, LI Sai. Dynamic reconfiguration of active distribution network based on grid structure similarity and adaptability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(16):78-86.
- [17] 潘本仁,王和春,张妍,等.含分布式电源的主动配电网重构策略研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(15):102-107.
PAN Benren, WANG Hechun, ZHANG Yan, et al. Study on active distribution network reconfiguration strategy with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15):102-107.

作者简介:

张太升(1969),男,河南巩义人,硕士,高级工程师,从事电力调度继电保护工作。

(责任编辑 郝洁)