考虑对外支撑能力的电热综合能源系统建模及优化运行

徐德树[1],刘艳昉[1],赵号[2],马志强[1]
(1.天津电气科学研究院有限公司,天津 300180;
2.中国能源建设集团天津电力设计院有限公司,天津 300180)

摘要:综合能源系统内部含有可调资源且运行方式灵活多变,在一定程度上对电网发挥支撑能力,辅助电网优化运行。基于此,提出了计及对外支撑能力的综合能源系统优化运行模型。首先,以电热综合能源系统为研究对象,建立电热综合能源系统模型;其次,考虑外部电网的期望支撑需求,以最大程度满足外部电网期望支撑需求为目标,建立电热综合能源系统优化运行模型;考虑模型的非线性,采用细菌群体趋药性优化算法求解。最后,以我国北方某综合能源系统为例,验证了所建模型的有效性,通过调整电热综合能源系统灵活运行,能够有效地满足外部电网的期望支撑需求,发挥对外支撑作用。

关键词:综合能源系统;对外支撑;可调资源;优化运行
中图分类号:TM73 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd25372

Optimal Operation of Integrated Energy System Considering the Support Capacity to Power Grid

XU Deshu[1],LIU Yanfang[1],ZHAO Hao[2],MA Zhiqiang[1]
(1.*Tianjin Research Institute of Electric Science Co.,Ltd.*,*Tianjin* 300180,*China*;
2.*China Energy Engineering Group Tianjin Electric Power Design Institute Co.,Ltd.*,*Tianjin* 300180,*China*)

Abstract: The integrated energy system contains adjustable resources and flexible operating modes,which to a certain extent play a supporting role in the power grid and assist in optimizing its operation. Based on this,an optimal operation model of integrated energy system considering support capacity to power grid was proposed. Firstly,the electric-heat integrated energy system(EHIES)was considered as the research object and the EHIES model was established. Secondly,considering the expected support demand of external power grid and aiming at meeting the expected support demand of external power grid,the optimal operation model of EHIES was established. Considering the complexity of the model,the Bacterial Colony Chemotaxis optimization algorithm was used to solve it. Finally,an integrated energy system in northern China was considered as an example and the effectiveness of the proposed model was verified. By adjusting the flexible operation of the EHIES,it can effectively meet the expected support needs of the external power grid and play an external support role.

Key words:integrated energy system(IES);support to power grid;adjustable resources;optimal operation

为了应对全球气候变暖以及化石能源资源紧缺问题,实现经济可持续发展,新能源发电迅速发展,电网渗透率逐年上升[1-2]。以风能、太阳能为代表的新能源发电已成为我国第二大电源,风电和光伏具有很强的波动性、间歇性以及不确定性,容易导致调峰困难,对电网安全运行带来挑战,造成弃风弃光的现象。

随着能源体系的优化调整以及能源互联网的发展,各类供能系统耦合度逐渐增强,为了提高能源综合利用率,减少污染气体排放,必须将电、冷、热等多个独立的供能系统进行融合,形成综合能源系统(integrated energy system,IES)[1,3],从而实现全社会能源系统协调发展。综合能源系统指在规划、建设和运行等过程中,通过对能源的产生、传输与分配、转换、存储、消费等环节进行有机协调与优化后,形成的能源产供销一体

作者简介:徐德树(1989—),女,硕士研究生,工程师,主要研究方向为电力电子及自动化,Email:532109092@qq.com

化系统，主要由能源供给网络、能源转换网络、能源存储网络、能源传输网络以及用户网络组成[4-5]。实际终端能源需求中最主要的是电能与热能，同时二者也是综合能源系统主要能量流模式[6]。

目前已有大量针对电热综合能源系统（electric-heat integrated energy system，EHIES）调度运行的研究。文献[7]系统性地介绍了冷热电联供型综合能源系统中的建模以及能量管理等基本问题。文献[8]考虑不同时间尺度，建立了电热联合调度系统优化模型，提出了3个时间尺度的优化调度策略。文献[9]分别考虑电能的实时性和热能的延迟性，提出了分时间尺度的电热综合能源系统经济调度模型。文献[10]考虑高渗透率风电影响，建立综合能源系统热电能量优化模型，结果表明电蓄热装置可实现热电解耦，能够有效促进风电消纳。文献[11-12]为了实现电热系统的信息保密，建立了基于Benders分解法的电热综合能源系统优化运行模型。文献[13]以年运行费用、年污染排放和年能耗为目标，建立园区综合能源系统优化运行模型，运用两阶段优化方法进行优化。文献[14]分析了负荷和可再生能源发电的波动性，考虑负荷需求和系统成本，进行了综合能源系统的多目标优化。文献[15]以居民冷热电三联供系统为研究对象，从能效性、经济性和环保性出发，提出了一种多目标优化模型。

综合能源系统与配电网之间的能量双向流动，一方面，配电网为园区综合能源系统提供电力补给供应，保证系统内的可靠用电；另一方面，综合能源系统能够提高配电网的运行复杂度，增加电网负荷的多样性和不确定性。综合能源系统的运行方式灵活多变，给电网的调度运行带来极大的挑战。综合能源系统内部含有能源生产设备，除了满足自身负荷需求之外，还可以在一定程度上对电网发挥支撑作用，协助电网优化运行。关于电热综合能源系统的调度运行研究的已有成果，均只考虑综合能源系统自身的经济性，电网侧作为备用处理，电能交换满足一个上下限约束或没有约束，鲜有考虑综合能源系统对电网的支撑能力的研究。

为了解决上述问题，本文以电热综合能源系统为研究对象，统筹综合能源系统内部能源生产设备和电热负荷需求，与外部电网互为备用，配合外部电网调度策略，考虑对外支撑能力，建立综合能源系统优化运行模型，采用细菌群体趋药性优化算法求解，最后通过仿真验证了电热综合能源系统能够灵活运行，满足外部电网需求，为外部电网优化调度提供有效支撑。

1 电热综合能源系统模型

电热综合能源系统主要包含光伏电池（photovoltaic，PV）、风力发电机（wind turbine，WT）、电制冷机（electric chiller，EC）、电锅炉（electric boiler，EB）、储热装置（thermal storage，TS）等设备，系统与大电网相连。EHIES内电负荷需求由PV，WT和大电网满足，热负荷需求由EB和TS满足，冷负荷需求由EC满足，如图1所示。

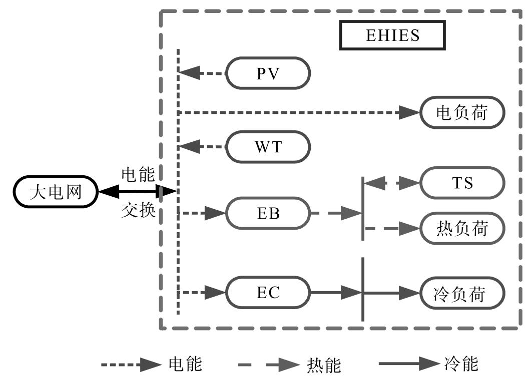

图1　电热综合能源系统结构

Fig.1　Electric heating integrated energy system structure

1.1　光伏电池

光伏电池将太阳辐射能转换为电能，其输出功率主要受光照强度和外界温度的影响，如下式所示：

$$P_{\mathrm{PV},t}=P_{\mathrm{STC}}\frac{G_{\mathrm{AC},t}}{G_{\mathrm{STC}}}\left[1+K_{\mathrm{T}}\left(T_{c,t}-T_{\mathrm{r}}\right)\right] \tag{1}$$

式中：$P_{\mathrm{PV},t}$为光伏电池在t时段的电功率；P_{STC}为光伏电池在标准条件（1 000 W/m^2，25 ℃）下的最大电功率；$G_{\mathrm{AC},t}$为t时段的光照强度；G_{STC}为标准测试条件下的光照强度；K_{T}为功率温度系数；$T_{\mathrm{c},t}$为光伏电池温度；T_{r}为参考温度。

1.2　风力发电机

风力发电机将风能转换为电能，其输出功率主要受风速的影响，如下式所示：

$$P_{\mathrm{WT},t}=v^3\rho\pi R_{\mathrm{WT}}^2C_{\mathrm{p}}/2 \tag{2}$$

式中：$P_{\mathrm{WT},t}$为风力发电机在t时段的电功率；v为风速；ρ为空气密度；R_{WT}为风机叶片的半径；C_{P}为风能利用系数。

1.3　电锅炉

电锅炉消耗电能产生热能，为热力系统提供热能需求，连同储热装置能够满足热负荷需求，

在一定程度上缓解“以热定电”,提高新能源消纳[16]。电锅炉的运行数学模型如下式所示:

$$Q_{\mathrm{EB},t}=\eta_{\mathrm{EB}}P_{\mathrm{EB},t} \tag{3}$$

式中:$Q_{\mathrm{EB},t}$为t时刻电锅炉热功率;$P_{\mathrm{EB},t}$为t时刻电锅炉消耗有功功率;η_{EB}为电锅炉的制热效率。

1.4　电制冷机

电制冷机消耗电能满足冷负荷需求,根据工作灵活性,优先使用风力发电和光伏发电,提高新能源消纳量,在减少购电成本的同时,能够有效减少二氧化碳排放。电制冷机运行数学模型如下式所示:

$$C_{\mathrm{EC},t}=COP^{\mathrm{Q,EC}}P_{\mathrm{EC},t} \tag{4}$$

式中:$C_{\mathrm{EC},t}$为电制冷机在t时刻的制冷功率;$P_{\mathrm{EC},t}$为电制冷机在t时刻消耗的电功率;$COP^{\mathrm{Q,EC}}$为电制冷机电制冷性能系数。

1.5　储热装置

储热装置可以在制热成本低时存储热能,在制热成本高时释放热能。储热设备的引入,可灵活参与系统调度,提高系统可控性和灵活性,有效降低系统的运行成本。本文以水作为储热介质,无需设置换热器,并且储热装置主要是针对综合能源系统进行供热。储热装置的数学模型如下式所示:

$$H_{\mathrm{HS},t}=(1-\tau_{\mathrm{HS}})H_{\mathrm{HS},t-1}+[\eta_{\mathrm{HSch}}Q_{\mathrm{HS-ch},t}-\frac{Q_{\mathrm{HS-dis},t}}{\eta_{\mathrm{HSdis}}}]\Delta t \tag{5}$$

式中:$H_{\mathrm{HS},t}$为t时刻储能装置存储能量状态值;$Q_{\mathrm{HS-ch},t}$为Δt时段储热装置的储热功率;$Q_{\mathrm{HS-dis},t}$为Δt时段储热装置的放热功率;τ_{HS}为储热装置散热损失率;η_{HSch}为Δt时段储热装置的储热效率;η_{HSdis}为Δt时段储热装置的放热效率。

2　考虑对外支撑能力的EHIES优化运行模型

本文统筹综合能源系统内部能源生产设备和电热负荷需求,可以与外部电网进行电功率交换互为备用,配合外部电网调度策略,协助电网优化运行。外部电网对EHIES发出期望支撑需求,以EHIES能够最大程度满足外部电网期望支撑需求为目标,建立EHIES优化运行模型。

2.1　目标函数

在EHIES运行策略优化过程中,考虑EHIES能够最大程度满足外部电网期望支撑需求为目标,目标函数如下式所示:

$$\min F=\min\frac{\sum_{t=1}^{T}\{[P_{\mathrm{g}}(t)-P_{\mathrm{gd}}(t)]-\bar{P}\}^2}{T} \tag{6}$$

其中　$$\bar{P}=\sum_{t=1}^{T}[P_{\mathrm{g}}(t)-P_{\mathrm{gd}}(t)]/T$$

式中:T为调度总时段;$P_{\mathrm{g}}(t)$为EHIES在第t时刻与外部电网的电能交易量,正值表示电能从EHIES流向外部电网,负值表示电能从外部电网流向EHIES;$P_{\mathrm{gd}}(t)$为外部电网在第t时刻的期望支撑需求;$\bar{P}$为调度周期内电能交易量与期望支撑需求差值的平均值。

2.2　约束条件

2.2.1　功率平衡约束

电热综合能源系统运行中功率平衡约束要求满足电、热、冷负荷需求,包括电力平衡、热功率平衡和冷功率平衡。

1)电功率平衡约束:

$$P_{\mathrm{PV},t}+P_{\mathrm{WT},t}-P_{\mathrm{g},t}=P_{\mathrm{EB},t}+P_{\mathrm{EC},t}+P_{\mathrm{eload},t} \tag{7}$$

式中:$P_{\mathrm{eload},t}$为EHIES中在第t时刻电负荷功率。

2)热功率平衡约束:

$$Q_{\mathrm{EB},t}+Q_{\mathrm{HS-dis},t}=Q_{\mathrm{load},t}+Q_{\mathrm{HS-ch},t} \tag{8}$$

式中:$Q_{\mathrm{load},t}$为EHIES中在第t时刻热负荷功率。

3)冷功率平衡约束:

$$C_{\mathrm{EC},t}=C_{\mathrm{load},t} \tag{9}$$

式中:$C_{\mathrm{load},t}$为EHIES中在第t时刻冷负荷功率。

2.2.2　不平衡约束

1)能源生产设备运行约束。EHIES中各能源生产设备的运行约束为设备工作功率的上、下限约束,如下所示:

$$0\leqslant P_{\mathrm{PV},t}\leqslant P_{\mathrm{PV}}^{\max} \tag{10}$$

$$0\leqslant P_{\mathrm{WT},t}\leqslant P_{\mathrm{WT}}^{\max} \tag{11}$$

$$0\leqslant Q_{\mathrm{EB},t}\leqslant Q_{\mathrm{EB}}^{\max} \tag{12}$$

$$0\leqslant C_{\mathrm{EC},t}\leqslant C_{\mathrm{EC}}^{\max} \tag{13}$$

式中:$P_{\mathrm{PV}}^{\max}$,$P_{\mathrm{WT}}^{\max}$分别为光伏电池、风力发电机的出力上限;$Q_{\mathrm{EB}}^{\max}$,$C_{\mathrm{EC}}^{\max}$分别为电锅炉和电制冷机的制热功率和制冷功率上限。

2)储热装置运行约束。约束条件包括储热装置储热能量的上、下限约束、充/放能速率上、下限约束、储热装置只能处在充能或放能单一状态、储热装置在一天开始时和结束时储能量相等,如下所示:

$$\rho_k^{\min}H_{\mathrm{HS}}^{\mathrm{nom}}\leqslant H_{\mathrm{HS},t}\leqslant\rho_k^{\max}H_{\mathrm{HS}}^{\mathrm{nom}} \tag{14}$$

$$0\leqslant Q_{\mathrm{HS-ch},t}\leqslant Q_{\mathrm{HS-ch}}^{\max} \tag{15}$$

$$0\leqslant Q_{\mathrm{HS-dis},t}\leqslant Q_{\mathrm{HS-dis}}^{\max} \tag{16}$$

$$Q_{\mathrm{HS-dis},t}Q_{\mathrm{HS-ch},t}=0 \tag{17}$$

$$H_{\mathrm{HS},0}=H_{\mathrm{HS},T} \tag{18}$$

式中：$H_{\mathrm{HS}}^{\mathrm{nom}}$为储热装置的额定容量；$\rho_k^{\min}$，$\rho_k^{\max}$分别为允许储热能量与容量的比值的最小值和最大值；$Q_{\mathrm{HS-ch},t}$，$Q_{\mathrm{HS-dis},t}$分别为储热装置的储热和放热功率；$Q_{\mathrm{HS-ch}}^{\max}$，$Q_{\mathrm{HS-dis}}^{\max}$分别为储热装置最大储热功率和放热功率；$H_{\mathrm{HS},0}$，$H_{\mathrm{HS},T}$分别为储能设备一天开始时和结束时的储能量。

3）EHIES与外部电网功率交互约束。由于网络架构限制，外部电网与EHIES的最大功率交换值受限，因此EHIES与外部网络的功率交换不可超过上限值。

$$P_{\mathrm{g},t}^{\min}\leqslant P_{\mathrm{g},t}\leqslant P_{\mathrm{g},t}^{\max} \tag{19}$$

式中：$P_{\mathrm{e}}^{\min}$，$P_{\mathrm{e}}^{\max}$分别为最小和最大电功率交换值。

2.3 模型求解方法

本文建立的EHIES优化运行模型是高维度、多约束、非线性方程，传统的数学方法无法求解，本文采用智能优化算法进行求解。细菌群体趋药性优化算法不仅单个细菌具备一定的寻优能力，而且细菌能够感知周围同伴信息实现群体寻优，各细菌位置更新的移动方向和时间都是服从一定概率分布的，具有较好的收敛性能。而在其他群体智能算法中，单个个体脱离群体后都只是随机搜索，失去了寻优能力。因此，本项目采用细菌群体趋药性算法求解。求解流程如图2所示。

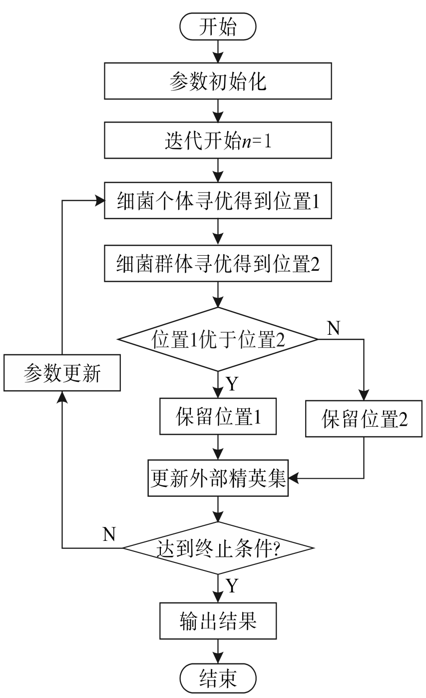

图2　求解流程图

Fig.2　Solution flow chart

3 算例仿真

3.1 算例数据

为验证本文所提模型的有效性，选取我国北方某综合能源系统为例进行研究。所选EHIES中PV装机容量60 kW，WT装机容量640 kW，EB额定容量400 kW，EC额定容量420 kW，TS额定容量1.5 MW·h。选取该系统冬季某典型日，电、热、冷负荷及风、光出力值采用实测数据，优化初始时刻为09:00，优化终止时刻为次日09:00。典型日负荷需求和风光出力值分别如图3和图4所示，外部电网调度周期内期望支撑需求如图5所示。

3.2 仿真结果分析

为了有效说明EHIES满足外部电网的期望

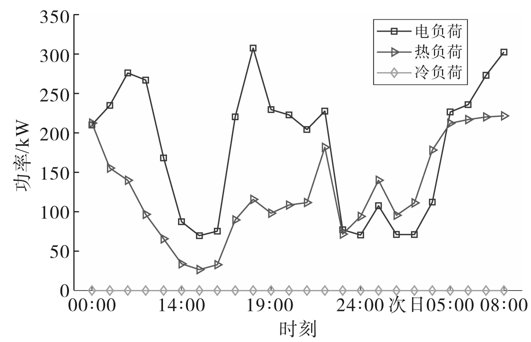

图3　典型日负荷曲线

Fig.3　Load curves of typical daily

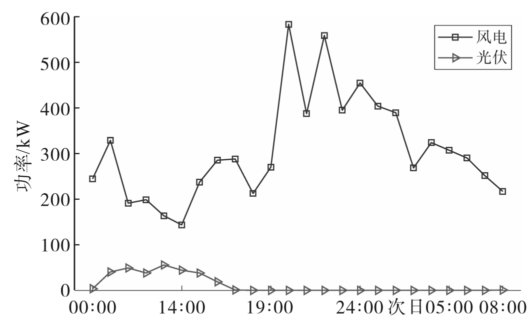

图4　典型日风光出力

Fig.4　Output of typical daily

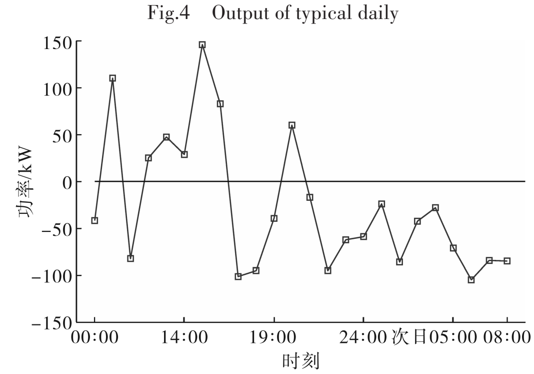

图5　外部电网期望支撑需求曲线

Fig.5　Expectation supports the demand curve of external grid

支撑需求的能力,同时对EHIES运行的经济性进行分析,可以对EHIES经济成本最优运行方案和满足对外支撑运行方案进行对比讨论,EHIES运行成本包括购电成本、设备维护成本和对外部电网售电收益三部分。本文设置了以下两种场景进行分析:

场景一:EHIES以满足对外电网的期望支持需求为目标。

场景二:EHIES以经济成本最优为目标。

3.2.1　运行策略结果分析

本节对场景一和场景二的运行策略优化结果进行对比分析,两种场景的运行策略优化结果分别如图6和图7所示。从优化结果可以看出,两种场景下EHIES内各能源生产设备和能源转换设备相互配合,均能满足EHIES内电热负荷需求。当处于电负荷高峰时段,风机、光伏和外部电网共同满足内部电负荷需求,此时电锅炉处于低功率状态运行或停运状态,热负荷主要靠储能装置释放热功率满足热负荷需求。当处于电负荷低谷时段,风机、光伏和外部电网共同满足内部电负荷需求,夜间由风机和外部电网满足电负荷需求;夜间风电出力较大,而电负荷需求减小,电锅炉处于高功率状态运行消耗多余的风电,除了满足热负荷需求外,富余的热量存储到储热装置中。

3.2.2　对外支撑能力结果分析

本节对两种场景下EHIES对外部电网的支撑能力进行讨论分析,两种场景EHIES与外部电网的电能交换曲线如图8所示。从图中可以看出,场景一大多数时刻EHIES都能满足外部电网的期望支撑需求,只有在个别时刻无法满足。以时刻12:00为例说明场景一不能满足外部电网期望支撑需求的情况,在这个时刻EHIES内部电负荷需求为266.94 kW,而此时风电和光伏出力之和为236.54 kW,还有30.40 kW的电力缺口,而该时刻外部电网的期望支撑需求为25 kW,而对于EHIES来说,内部电负荷的需求优先级更高,因此EHIES需要从外部电网购买电能满足电负荷需求,而无法满足外部电网的期望支撑需求。场景二EHIES运行策略基本不能满足外部电网的期望支撑需求,主要是因为场景二的优化目标为EHIES运行经济成本最优,而并不以满足外部电网的期望支撑需求为目标。以上结果分析,可以看出EHIES通过灵活运行,能够有效地满足对外

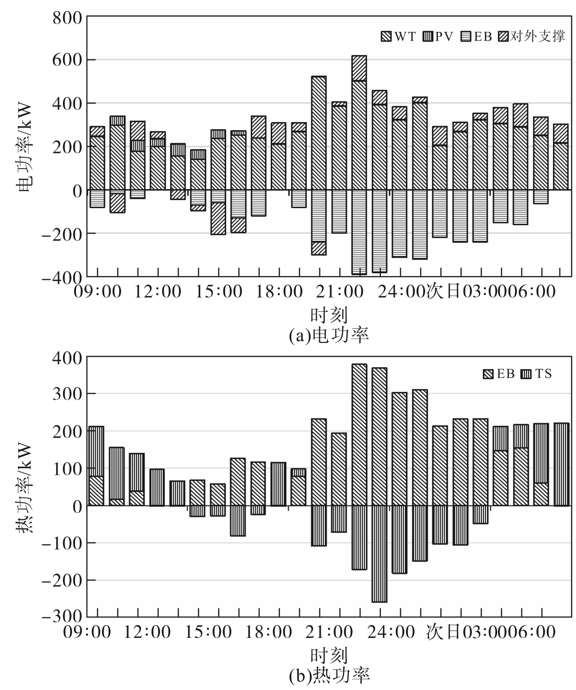

图6　场景一运行策略

Fig.6　Operation strategy under scenario 1

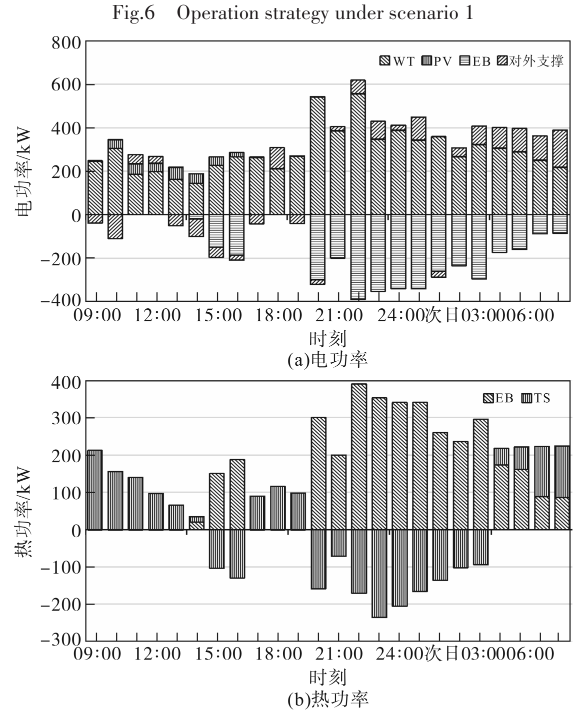

图7　场景二运行策略

Fig.7　Operation strategy under scenario 2

部电网的期望支撑需求。

3.2.3　新能源消纳结果分析

本节对两种场景下EHIES新能源消纳进行讨论分析,两种场景EHIES新能源消纳曲线如图9所示。从图中可以看出,两种场景下光伏发电均能完全消纳,二者均有不同程度的弃风。从风电消纳曲线可以看出,场景二风电的消纳量要略微高于场景一,场景二以EHIES运行经济成本最

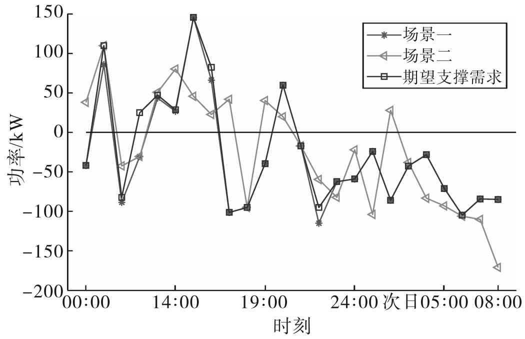

图8　两种场景下EHIES与外部电网电能交换曲线

Fig.8　Power exchange curves of EHIES and external grid under two scenarios

优为目标，尽可能地消纳新能源，减少从外部电网的电能购买量，降低经济成本，而场景一以满足外部电网的期望支撑需求为目标，承担外部电网的调峰需求，增加电能购买量，从而减少了新能源消纳量。虽然场景一新能源消纳量降低，但是其降低百分比约为3%，由此可以看出，考虑对外支撑能力的综合能源系统优化运行对新能源消纳量产生的影响较小。

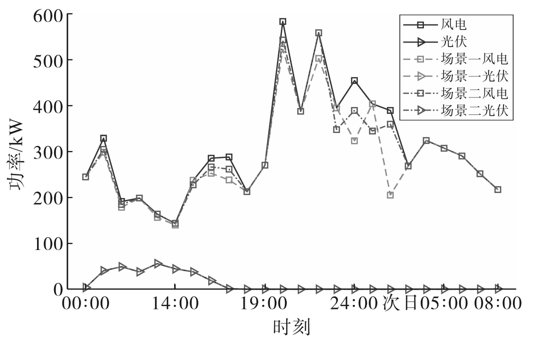

图9　两种场景下EHIES新能源消纳曲线

Fig.9　EHIES new energy absorption curves under two scenarios

3.2.4　经济性分析

本节对两种场景下EHIES运行方案经济性进行讨论分析，场景一和场景二的EHIES运行方案经济成本为641.59元和572.54元。从数据可以看出，场景一运行成本要高于场景二，场景一为了满足外部电网的期望支撑需求，在非谷电价时段内增加了从电网的购电量，提高了电锅炉的运行功率和减少了部分新能源的消纳量，EHIES需要牺牲一定的经济性，满足外部电网的期望支撑需求。

需要注意的是，本文没有考虑外部电网对EHIES的经济补偿，在成熟的市场交易中，外部电网要求综合能源系统提供支撑，则需要给予一定的政策或经济补偿，以减少对方的损失或带来一定的收益。

4　结论

本文提出了计及对外支撑能力的EHIES优化运行模型，统筹考虑EHIES内部能源生产设备和电热负荷需求，与外部电网进行电功率交换互为备用，利用EHIES内设备的灵活运行特性，以能够最大程度满足外部电网期望支撑需求为目标，协助电网优化运行，得到EHIES优化运行策略。最后通过以北方某综合能源系统实际数据为例分析验证了本文所提模型的有效性，所得结论如下：

1）通过EHIES内部能源生产设备和能源存储设备能够灵活运行，能够在为系统内部负荷可靠供能的前提下，可以有效地满足外部电网的期望支撑需求，发挥对外支撑作用，减轻电网调峰压力。

2）EHIES在满足外部电网期望支撑需求时，会一定程度上削减系统内部新能源的消纳量，需要增加运行成本，牺牲一定的经济性。结果表明，考虑对外支撑能力的综合能源系统优化运行对新能源消纳量产生的影响较小；如果给予一定的政策或经济补偿，将会减少EHIES的损失或增加其收益。

3）综合能源系统和外部电网能够合理地协调优化运行，考虑综合能源系统对电网的支撑能力，能够在现有的电网运行情况下，更大限度地建设综合能源系统，为综合能源系统发展建设提供理论支持。

参考文献

[1]　潘莉莉. 含热电联系统的多能源互联网的优化调度研究[D]. 秦皇岛：燕山大学，2018.
PAN Lili. Rearch on the optimal dispatch of multi-energy interconnected microgrid with a combined heat and power system [D]. Qinhuangdao：Yanshan University，2018.

[2]　ATTYA A B，ALI H，HARTKOPF T. Frequency drops mitigation at high wind energy penetration by hydro-pumped storage-capacity sizing[C]//17th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference，Beirut，Lebanon，2014：543-547.

[3]　秦婷，刘怀东，王锦桥. 基于碳交易的电-热-气综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力系统自动化，2018，42（14）：8-13，22.
QIN Ting，LIU Huaidong，WANG Jinqiao. Carbon trading based low-carbon economic dispatch for integrated electricity-heat-gas energy system[J]. Automation of Electric Power Systems，2018，42（14）：8-13，22.

[4] 贾宏杰,王丹,徐宪东,等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化,2015,39(7):198-207.
JIA Hongjie,WANG Dan,XU Xiandong,et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(7):198-207.

[5] 余晓丹,徐宪东,陈硕翼. 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. A brief review to integrated energy system and energy internet[J]. Transctions of China Electrotechnical Society,2016,31(1):1-13.

[6] GU Wei,WANG Zhihe,WU Zhi,et al. An online optimal dispatch schedule for CCHP microgrids based on model predictive control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2016,8(5):2332-2342.

[7] GU W,WU Z,BO R,et al. Modeling,planning and optimal energy management of combined cooling,heating and power microgrid:a review[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2014,54(1):26-37.

[8] 邓佳乐,胡林献,邵世圻,等. 电热联合系统多时间尺度滚动调度策略[J]. 电网技术,2016,40(12):3796-3802.
DENG Jiale,HU Linxian,SHAO Shiqi,et al. Multi-time scale rolling scheduling method for combined heat and power system[J]. Power System Technology,2016,40(12):3796-3802.

[9] 朱承治,陆帅,周金辉,等. 基于电-热分时间尺度平衡的综合能源系统日前经济调度[J]. 电力自动化设备,2018,38(6):138-151.
ZHU Chengzhi,LU Shuai,ZHOU Jinhui,et al. Day-ahead economic dispatch of integrated energy system based on electricity and heat balance in different time scales[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(6):138-151.

[10] 刘方,杨秀. 含电蓄热解决高渗透率风电消纳问题的微网热电能量综合优化[J]. 现代电力,2015,32(4):19-26.
LIU Fang,YANG Xiu. Comprehensive optimization of heat and electric energy for micro-grid with electric heat storage to solve the high penetration problem of wind power consumption[J]. Modern Electric Power,2015,32(4):19-26.

[11] 卢志刚,杨宇,耿丽君,等. 基于 Benders 分解法的电热综合能源系统低碳经济调度[J]. 中国电机工程学报,2018,38(7):1922-1934,2208.
LU Zhigang,YANG Yu,GENG Lijun,et al. Low-carbon economic dispatch of the integrated electrical and heating systems based on benders decomposition[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(7):1922-1934,2208.

[12] 张雨曼,刘学智,严正,等. 光伏-储能-热电联产综合能源系统分解协调优化运行研究[J]. 电工技术学报,2020,35(11):94-108.
ZHANG Yuman,LIU Xuezhi,YAN Zheng,et al. Decomposition-coordination based optimization for PV-BESS-CHP integrated energy systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2020,35(11):94-108.

[13] 周灿煌,郑杰辉,荆朝霞,等. 面向园区微网的综合能源系统多目标优化设计[J]. 电网技术,2018,42(6):1687-1697.
ZHOU Canhuang,ZHENG Jiehui,JING Zhaoxia. Multi-objective optimal design of integrated energy system for park-level microgrid[J]. Power System Technology,2018,42(6):1687-1697.

[14] ZARE M,NIKNAM T,AZIZIPANAH-ABARGHOOEE R,et al. New stochastic bi-objective optimal cost and chance of operation management for smart microgrid[J]. IEEE Transation on Industrial Informatics,2016,12(6):2031-2040.

[15] ABDOLLAHI H S G. Application of the multi-objective optimization and risk analysis for the sizing of a residential small-scale CCHP system[J]. Energy and Buildings,2013,60(3):330-344.

[16] 赵号,原云周,徐德树,等. 基于多代理技术的多区域综合能源管理系统架构设计[J]. 电力需求侧管理,2022,24(4):47-52.
ZHAO Hao,YUAN Yunzhou,XU Deshu,et al. Architeture design of multi-region integrated energy management system based on multi-agent techonology[J]. Power Demand Side Management,2022,24(4):47-52.

收稿日期:2023-09-11
修改稿日期:2023-11-30

(上接第47页)

LC filters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2022,58(1):820-829.

[11] 陈坚. 电力电子学:电力电子变换和控制技术[M]. 北京:高等教育出版社,2011.
CHEN Jian. Power electronics:transformation and control technique[M]. Beijing:Higher Education Press,2011.

[12] 潘冬华,阮波,王学华,等. 提高LCL型并网逆变器鲁棒性的电容电流即时反馈有源阻尼方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(18):1-10.
PAN Donghua,RUAN Xinbo,WANG Xuehua,et al. A capacitor-current real-time feedback active damping method for improving robustness of LCL-type grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(18):1-10.

[13] HE Shan,ZHOU Dao,WANG Xiongfei,et al. A review of multisampling techniques in power electronics applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2022,37(9):10514-10533.

[14] ZHAO Zhihong,SUN Zhichao,FENG Yilong,et al. High-performance resonant controller implemented in the discrete-time domain for voltage regulation of grid-forming converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2022,37(4):3913-3926.

收稿日期:2023-01-16
修改稿日期:2023-02-27