

# 考虑多能转换及需求响应的系统优化调度研究

王佳颖<sup>1</sup>,陆春光<sup>1</sup>,严华江<sup>1</sup>,石坤<sup>2</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司 营销服务中心,杭州 311121;2. 中国电力科学研究院有限公司,北京 100192)

**摘要:**多能转换以及电力需求响应是提高能源利用率、减轻系统供能压力、平衡供需两侧的有效途径。考虑多能转换的电力需求响应技术,针对系统中多种能源的相互转换相互替代,结合价格型电力需求响应,来提高系统的供能能力、平抑负荷侧波动、促进系统对风光的消纳。首先,对能源输入、多能转换、多能储能等环节的相关设备进行线性化建模,建立电力负荷多能转换的统一模型,分析由此形成的电能存储特性;其次,基于峰谷分时电价,建立可削减、可转移、可替代3种负荷模型;最后,考虑系统运行的4大约束条件,以系统运行综合成本最低为目标函数,研究考虑多能转换电力需求响应对系统运行的优化作用,通过Yalmip建模语言建模,并调用Cplex求解器进行求解。以目标函数最优求解结果作为依据,来验证模型的有效性与可行性,可以进一步减少系统运行成本,最大限度提升电力系统消纳风电能力。

**关键词:**多能转换;需求响应;优化调度;消纳风光

## Research on system optimization scheduling considering multi energy conversion and demand response

WANG Jiaying<sup>1</sup>, LU Chunguang<sup>1</sup>, YAN Huajiang<sup>1</sup>, SHI Kun<sup>2</sup>

(1. Marketing Service Center, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 311121, China;2. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

**Abstract:** Multi-energy conversion and power demand response are effective ways to improve energy utilization, reduce system energy supply pressure, and balance supply and demand. Power demand response technology considers multi-energy conversion, aiming at the mutual conversion and substitution of multiple energy sources in the system, combined with price-based power demand response, to improve the energy supply capacity of the system, stabilize the load side fluctuation, and promote the system to eliminate wind and solar energy. First, linearize the modeling of related equipment in energy input, multi-energy conversion, multi-energy storage and other links a unified model for multi-energy conversion of electrical loads is proposed, and the resulting electrical energy storage characteristics are analyzed. Second, based on the peak-valley time-of-use electricity price, establish three load models that can be reduced, transferable, and replaceable. Finally, considering the four constraints of system operation, taking the lowest comprehensive cost of system operation as the objective function, the optimization effect of multi-energy conversion power demand response on system operation is studied, modeled by Yalmip modeling language, and Cplex solver is called to solve. Based on the optimal solution result of the objective function, the validity and feasibility of the model in this thesis are verified, which can further reduce the operating cost of the system and maximize the ability of the power system to absorb wind power.

**Key words:** multi-energy conversion; demand response; optimized operation; accommodation of wind and solar

## 0 引言

通过考虑多能转换的电力需求响应技术,在供能侧实现电能存储,促进系统消纳风光,在用户侧改变供能方式,扩大需求响应的调整空间,供能侧与用户侧的灵活配合,更深层次地调节平抑了供能侧的出力波动和用户侧的负荷曲线波动,从而达到提高供能水平、缓解电网供能压力、提高电网消纳风光能力的目标。

文献[1]提出了一种削峰填谷模型,通过电转气设备和燃气轮机协调作用平滑电-气互联净负荷曲线,并兼顾系统运行的经济性。文献[2]针对以燃煤热电联产与天然气冷热电三联供为基础的两类典型的多能互补设备,提出了一种协调控制方法。

文献[3]结合需求响应,考虑了深度调峰定价,将低谷电价时的多余电量,转换为热能的形式存储于储热系统,使系统负荷侧曲线波动减少,其为能源供应的时间转移提供条件。文献[4]研究了电转气对系统运行的影响,考虑了电气转换对系统运行的调度作用。文献[5]建立了多能互补发电系统电/热/氢储能

收稿日期:2024-10-04;修回日期:2024-12-17

基金项目:国家电网有限公司总部项目(5400-202319244A-1-1-ZN)

容量协调优化配置方法。文献[6]以电、气、热、冷多能耦合园区系统为研究对象,考虑系统运行、需求响应、用户用能满意度等约束条件,提出了考虑综合需求响应的综合能源系统多能协同优化调度策略。

文献[7]相较于传统电力系统,考虑多种能源流互相转换的多能互补系统具有更强的供能可靠性以及灵活性,同过不同能源之间的替代转换,可以有效提高能源的利用效率,缓解系统供能压力。

文献[8]分析了电力系统日前优化调度中需求响应所起的作用,同时研究了将需求响应用于多能源联合发电的电力系统中的方法。文献[9]在基于风电-聚光太阳能发电站的联合发电,存在电热转换的电力系统优化中,采用了价格型需求响应技术,研究了需求响应在负荷侧削峰填谷、促进系统消纳风电方面所起的作用。文献[10]根据负荷特性,将负荷分可削减、可转移、可替代3类,算例仿真结果表明需求响应的引入提高了系统设备的利用率和能源供应的安全性,保证了系统运行的高效性。文献[11]将激励型需求响应和价格型需求响应模型集成到风-光火多能互补系统中,实现了整体经济效益的提升和最小化能源废弃。文献[12]建立了包含多种类型负荷的综合需求响应模型,发挥削峰填谷作用显著提升了园区综合能源系统的调度能力。文献[13]在优化电气耦合综合能源系统运行的问题中引入需求响应,起到削峰填谷的作用,平抑了用户侧的负荷曲线。文献[14]通过需求响应进行系统优化运行调度,并充分考虑用户用电舒适度作为约束条件,来合理化需求响应策略。

由上述分析可以看出现有文献对多能转换和需求响应的优化规划问题都进行了大量的研究,但二者同时考虑的规划研究并不多,本文提出考虑多能转换的电力需求响应技术的优化规划模型,考虑供能侧与负荷侧的灵活配合调节,对系统进行综合规划,确保系统运行的经济性与稳定性。

## 1 多能转换系统建模

多能转换系统抽象分为3个部分:输入、转换、输出,该模型输入端有小型燃气轮机、上级电网、上级气网、风光等可再生新能源,转换设备有电转气、电转热、冰蓄冷等相应的以电为核心多能转换设备,输出端由储存装置和负荷两部分组成。

### 1.1 典型输入设备建模

#### (1) 燃气轮机

燃气轮机可与多能转换设备(power to gas, P2G)设备进行配合,当新能源发电过剩时,可以将

过剩的电力通过P2G设备转换为天然气进行储存,而在电力不足时,将储存的天然气通过燃气轮机进行发电,被燃气轮机所消耗用来发电的天然气,可视为天然气负荷。此处对燃气轮机的进行线性化建模

$$P_{GT,t}^e = \varphi_{GT} Q_{GT,t} H_g \quad (1)$$

式中:  $P_{GT,t}^e$  为燃气轮机输出的电功率;  $Q_{GT}$  为燃气轮机消耗的天然气流量;  $\varphi_{GT}$  为燃气轮机的转换效率;  $H_g$  为天然气热值,取  $9.88 \text{ kWh/m}^3$ 。

#### (2) 上级电网与上级气网

本文主要研究系统本身在各种场景下对风光可再生能源发电的消纳能力,因此不考虑将过剩的风光发电量出售给上级网络,由于目前技术瓶颈及运行成本等因素限制了P2G装置的容量,P2G装置换来的天然气只考虑供给燃气轮机消耗发电,因此本文不考虑向天然气网络售气情况。模型为

$$0 \leq P_{buy,t}^e \leq P_{buy}^{\max} \quad (2)$$

$$0 \leq Q_{buy,t}^g \leq Q_{buy}^{\max} \quad (3)$$

式中:  $P_{buy,t}^e$ 、 $Q_{buy,t}^g$  分别为  $t$  时刻向上级网络的购电量与购气量;  $P_{buy}^{\max}$ 、 $Q_{buy}^{\max}$  分别为向上级为网络的最大购电量与最大购气量。

#### (3) 风光出力约束

通过日前风电预测曲线来约束风电机组出力,光伏发电机组模型约束类似。模型约束表达式为

$$0 \leq P_{WT,t} \leq P_{WT,t}^{pre} \quad (4)$$

$$0 \leq P_{PV,t} \leq P_{PV,t}^{pre} \quad (5)$$

式中:  $P_{WT,t}$  为  $t$  时刻风力发电机组的输出电功率;  $P_{PV,t}$  为  $t$  时刻光伏发电机组的输出电功率;  $P_{WT,t}^{pre}$  为  $t$  时刻预测风力发电功率;  $P_{PV,t}^{pre}$  为  $t$  时刻预测光伏发电功率。

## 1.2 多能转换设备模型

多能转换通过相应的能量转换设备转变能量形式,实现不同能源之间的替代,提高系统较高的供能可靠性,来满足用户不同的能源需求,其统一模型可以简化为以电为核心的能源效率变换的线性函数

$$P_{out} = \eta_k P_{in} \quad (6)$$

式中:  $P_{out}$ 、 $P_{in}$  分别为设备的输出功率、输入电功率;  $\eta_k$  为设备  $k$  的能量转换效率。

## 1.3 储能统一模型

要实现不同能源之间的相互代替,并扩大电力需求响应的响应空间,仍需要多能储能设备来调整供给侧和需求侧的双向配合。考虑到系统中的多种储能装置,进而归纳出统一的多能储能模型,其模型方程为

$$E_{s,t} = (1 - \varepsilon_s) E_{s,t-1} + (\eta_{in} P_{in,t} - P_{out,t} / \eta_{out}) \Delta t \quad (7)$$

式中:  $E_{s,t}$  为  $t$  时刻储能装置  $s$  的储能容量;  $\varepsilon_s$  为储能装置  $s$  的自损耗系数;  $\eta_{in}$ 、 $\eta_{out}$  分别为储能装置  $s$

的充能效率、放能效率;  $P_{in,t}$ 、 $P_{out,t}$  分别为储能装置  $s$  的充能功率、放能功率。

## 2 需求响应建模

本文采用基于电网分时电价的价格型需求响应,并且考虑用户参与需求响应后的用电满意度,保障用户的用能舒适度,使得用户侧可以高效地参与系统运行优化,实现需求响应的目标。

根据负荷在响应中所体现的特性,将负荷分为可削减负荷(curtable load, CL)、可转移负荷(shiftable load, SL)和可替代负荷(replacable load, RL)。不同类型的负荷,在面对同一电价的变化信号时,所体现的敏感度存在较大的差异。

### 2.1 可削减负荷与可转移负荷

#### (1) CL特性分析及建模

可削减负荷是对电价的单时段响应,对应的是价格需求弹性矩阵中的自弹性系数,其模型可以表示为

$$\Delta P_{CL,t} = P_{CL,t}^0 \left[ \sum_{j=1}^{24} E_{CL}(t,j) \Delta \rho_j \right] \quad (8)$$

式中:  $P_{CL,t}^0$  为  $t$  时刻可削减负荷的初始量;  $P_{CL,t}$  为需求响应后可削减负荷的变化量;  $E_{CL}(t,j)$  为价格弹性矩阵的子弹性系数,为对角阵;  $\Delta \rho_j$  为  $j$  时刻的电价相对变化率。

#### (2) SL特性分析及建模

可转移负荷与可削减负荷不同,是对电价的多时段响应,对应的是价格需求弹性矩阵中的互弹性系数,其模型可以表示为

$$\Delta P_{SL,t} = P_{SL,t}^0 \left[ \sum_{j=1}^{24} E_{SL}(t,j) \Delta \rho_j \right] \quad (9)$$

式中:  $P_{SL,t}^0$  为  $t$  时刻可转移负荷的初始量;  $P_{SL,t}$  为需求响应后可转移负荷的变化量;  $E_{SL}(t,j)$  为价格弹性矩阵的互弹性系数;  $\Delta \rho_j$  为  $j$  时刻的电价相对变化率。

### 2.2 可替代负荷

可替代负荷的重点在于,在负荷低谷期,通过能量转换设备将过剩电能转换为冷热气,并进行储存,而在高峰期通过储存装置的放能替代原本需要消耗电力才能产生的冷热。以热能为例,其模型可以表示为

$$\Delta P_{RL,t} = -\varepsilon_{e,h} P_{RL,t}^{h0} \quad (10)$$

式中:  $P_{RL,t}$  为被替代的可替代电负荷量;  $P_{RL,t}^{h0}$  为用来替代的对应热负荷量;  $\varepsilon_{e,h}$  为电热替代系数; 式中的负号表示用来替代的对应热负荷量的增加体现为可代替电负荷的减少。

经过电力需求响应后的负荷变化量为

$$\Delta P_{L,t}^e = \Delta P_{CL,t} + \Delta P_{SL,t} + \Delta P_{RL,t} \quad (11)$$

式中:  $\Delta P_{L,t}$  为  $t$  时刻需求响应后的负荷变化量。

### 2.3 用户满意度

用户满意度主要包括两个方面,一个是用户用电方式满意度指标,另一个是用户电费支出满意度指标。

用电方式满意度  $m_s$  建模表达式为

$$m_s = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{24} |\Delta P_{L,t}^e|}{\sum_{t=1}^{24} P_{L,t}^e} \quad (12)$$

式中:  $\sum_{t=1}^{24} |\Delta P_{L,t}^e|$  为需求响应后  $t$  时刻的电力负荷变化量的绝对值之和;  $\sum_{t=1}^{24} P_{L,t}^e$  为需求响应前总的用电负荷。

电费支出满意度  $m_p$  建模表达式为

$$m_p = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{24} |\Delta C_t|}{\sum_{t=1}^{24} C_t} \quad (13)$$

式中:  $\sum_{t=1}^{24} |\Delta C_t|$  为需求响应后  $t$  时刻的用户电费支出的变化量之和;  $\sum_{t=1}^{24} C_t$  为需求响应前用户电费支出的总和。

二者的值越大,则表示用户对需求响应的结果满意度水平越高。

## 3 系统经济优化运行建模

### 3.1 目标函数

以综合成本最低为目标来优化系统运行,目标函数包括向上级网络购电购气成本、设备运行维护成本两大部分,此处不考虑各种设备的初始投资成本,风光可再生能源发电不消耗一次能源,也不计入成本。

目标函数可表示为

$$F = \min \{ C_{buy} + C_{op} \} \quad (14)$$

式中:  $C_{buy}$  为购电购气成本;  $C_{op}$  为运行维护成本。

#### (1) 购电购气成本 $C_{buy}$

系统可与上级电力网络进行电量交易需要额外购买天然气来维持燃气锅炉的运行消耗。因此购电购气成本为

$$C_{buy} = \sum_{t=1}^{24} (P_{buy,t}^e k_{e,t} + Q_{buy,t}^g k_g) \quad (15)$$

式中:  $P_{buy,t}^e$  为  $t$  时刻向上级电网的购电功率;  $k_{e,t}$  为  $t$  时刻需求响应后的电价;  $Q_{buy,t}^g$  为  $t$  时刻购买的天然气量;  $k_g$  为天然气的单位价格。

#### (2) 运行维护成本 $C_{op}$

$$C_{op} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^5 \omega_i P_{i,t} \quad (16)$$

式中:  $i$  取1,2,⋯,5,分别为风力发电机、光伏发电机、燃气锅炉、多能转换设备以及多能储能设备;  $\omega_i$  为设备  $i$  的运维系数;  $P_{i,t}$  为设备在  $t$  时刻的出力功率。

### 3.2 约束条件

系统优化运行的约束条件主要分为4大约束: 能量平衡约束、能量转换设备约束、储能设备约束和用户用电方式满意度约束。

#### (1) 能量约束平衡

经济调度优化的前提是保证系统内部各种能源功率平衡,包括电力平衡,热平衡,冷平衡,气平衡。

$$\begin{aligned} P_{\text{buy},t}^e + P_{\text{WT},t}^e + P_{\text{PV},t}^e + P_{\text{GT},t}^e + P_{\text{ES},t}^{\text{e,dis}} - P_{\text{EH},t}^e - P_{\text{EC},t}^e - P_{\text{P2G},t}^e = \\ P_{\text{ES},t}^{\text{e,ch}} + P_{\text{L},t}^c + P_{\text{L},t}^h \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{cases} P_{\text{EH},t}^h + P_{\text{HS},t}^{\text{h,dis}} = P_{\text{HS},t}^{\text{h,ch}} + P_{\text{L},t}^h \\ P_{\text{EC},t}^c + P_{\text{CS},t}^{\text{c,dis}} = P_{\text{CS},t}^{\text{c,ch}} + P_{\text{L},t}^c \\ Q_{\text{buy},t}^g + Q_{\text{P2G},t}^g = Q_{\text{GT},t}^g \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $P_{\text{EH},t}^e$ 、 $P_{\text{EH},t}^h$  分别为电制热设备的耗电功率、产热效率;  $P_{\text{EC},t}^e$ 、 $P_{\text{EC},t}^c$  分别为电制冷设备的耗电功率、制冷功率、率;  $P_{\text{P2G},t}^e$ 、 $Q_{\text{P2G},t}^g$  分别为P2G设备的耗电功率、制气功率;  $P_{\text{ES},t}^{\text{e,dis}}$ 、 $P_{\text{ES},t}^{\text{e,ch}}$  分别为  $t$  时刻蓄电池的放电功率、充电功率;  $P_{\text{HS},t}^{\text{h,dis}}$ 、 $P_{\text{HS},t}^{\text{h,ch}}$  分别为  $t$  时刻蓄热罐的放热功率、储热功率;  $P_{\text{CS},t}^{\text{c,dis}}$ 、 $P_{\text{CS},t}^{\text{c,ch}}$  分别为蓄冷罐的放冷功率、蓄冷功率;  $P_{\text{L},t}^c$ 、 $P_{\text{L},t}^h$  分别为  $t$  时刻的热负荷与冷负荷。

#### (2) 能量转换设备约束

$$\begin{cases} P_{\text{GT},t}^{\min} \leq P_{\text{GT},t}^e \leq P_{\text{GT},t}^{\max} \\ P_{\text{EH},t}^{\min} \leq P_{\text{EH},t}^h \leq P_{\text{EH},t}^{\max} \\ P_{\text{EC},t}^{\min} \leq P_{\text{EC},t}^c \leq P_{\text{EC},t}^{\max} \\ P_{\text{P2G},t}^{\min} \leq Q_{\text{P2G},t}^g \leq P_{\text{P2G},t}^{\max} \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $P_{\text{GT},t}^{\min}$ 、 $P_{\text{GT},t}^{\max}$  分别为燃气轮机的最小、最大发电功率;  $P_{\text{EH},t}^{\min}$ 、 $P_{\text{EH},t}^{\max}$  分别为电制热设备的最小、最大产热功率;  $P_{\text{EC},t}^{\min}$ 、 $P_{\text{EC},t}^{\max}$  分别为电制冷设备的最小、最大制冷功率;  $P_{\text{P2G},t}^{\min}$ 、 $P_{\text{P2G},t}^{\max}$  分别为P2G设备的最小、最大制气功率。

#### (3) 储能设备约束

储能设备的约束条件,可用统一的模型表达式进行描述

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{in},t} \leq \mu_t P_{\text{in},t}^{\max} \\ 0 \leq P_{\text{out},t} \leq (1 - \mu_t) P_{\text{out},t}^{\max} \\ E_s^{\min} \leq E_{s,t} \leq E_s^{\max} \\ E_{s,24} = E_{s,0} \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $P_{\text{in},t}^{\max}$ 、 $P_{\text{out},t}^{\max}$  分别为储能装置的最大充电功率、最大放电功率;  $E_s^{\min}$ 、 $E_s^{\max}$  分别为储能装置的最小储

能容量、最大储能容量;  $\mu_t$  为  $t$  时刻储能设备充、放能的标志位,限制储能设备同时充、放能,取值为0与1;  $E_{s,24}$ 、 $E_{s,0}$  分别为储能设备调度周期的结束容量和初始容量。

#### (4) 用户用电满意度约束

用户由于用电方式改变与电费支出改变,所产生的对用电舒适度的影响,会直接干涉到用户参与电力需求响应的积极性。

$$\begin{cases} 0 \leq m_{s,\min} \leq m_s \leq 1 \\ 0 \leq m_{p,\min} \leq m_p \leq 1 \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $m_{s,\min}$  为用户对用电方式的满意度下限值;  $m_{p,\min}$  为用户对电费支出的满意度下限值。

## 4 模型求解

首先,通过考虑多能转换的电力需求响应技术,得到需求响应后的负荷曲线,在能量平衡约束、能量转换约束、储能设备约束和用户用电满意度4大约束条件的限制下,求解最优经济运行的目标函数,通过基于Matlab平台的Yalmip建模语言进行建模编程,调用Cplex求解器完成目标函数最优解求解,具体求解流程如图1所示。

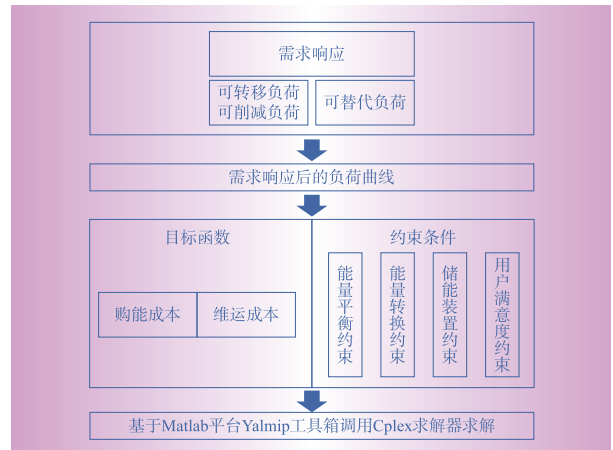


图1 系统优化求解流程

Fig. 1 Flow of system optimization solution

## 5 算例分析

### 5.1 场景分析

系统实时电价采用较为常规的峰谷分时电价,分为高峰、平谷、低谷3个电力价格,高峰时段为10:00—13:00、20:00—23:00;低谷时段为00:00—08:00;平谷时段为08:00—10:00、13:00—20:00、23:00—24:00。按照高峰电价1.09元/kWh,低谷电价0.35元/kWh,平段电价0.68元/kWh计费,向上级气网购买天然气价格为

4.8元/m<sup>3</sup>,折合为单位热值的价格为0.486元/kWh。

系统需求响应峰谷分时电价曲线以及风机、光伏预测出力曲线如图2、图3所示。

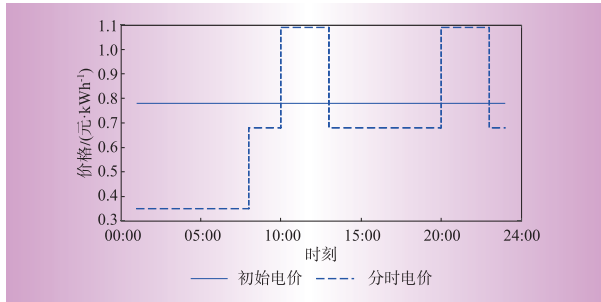


图2 需求响应峰谷分时电价曲线

Fig. 2 Demand response curves of peak and valley time-of-use electricity price

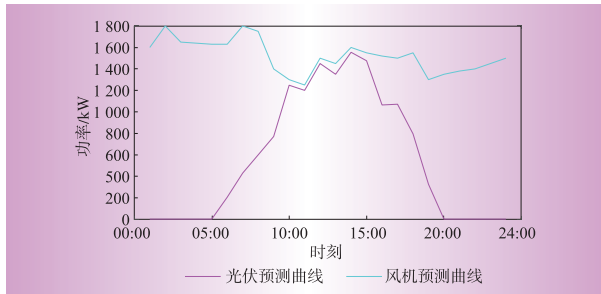


图3 风机与光伏预测出力曲线

Fig. 3 Predicted output curves of wind and PV

### 5.2 场景运行结果对比分析

为了研究考虑多能转换的电力需求响应技术对系统运行优化的影响,以及模型再提高风光以及系统经济性上的有效性,设置了2种场景进行对比分析,分别如下。

场景1:只考虑蓄电池储能的系统优化运行;

场景2:考虑多能转换的电力需求响应技术的系统优化运行

二者均以经济成本为目标函数,通过基于Matlab平台的Yalmip建模语言对系统设备进行建模,调用Cplex求解器完成求解。

各场景购能成本、维运成本如表1所示。

表1 各场景成本及弃风弃光量

Table 1 Cost of scenes and amount of abandoned wind and light

场景	购能成本/元	维运成本/元	总成本/元	弃风弃光/kWh
1	30 721	2 237	32 958	7 763
2	19 158	3 535	22 693	1 597

由表1可知,场景2与场景1相比,购能成本降低了37.64%,且弃风弃光量减少了6 166 kWh。这时由于考虑多能转换,使得弃风弃光量的减少,风光可再生能源发电得到更充分的利用,使得场景2

为满足系统供能而向上级电网、气网的购能总量减少,从而使得场景2的购能成本大幅降低。

场景2电负荷构成如图4与图5所示。从图4中可以看出,相比需求响应前负荷,需求响应后的负荷曲线更加平抑。

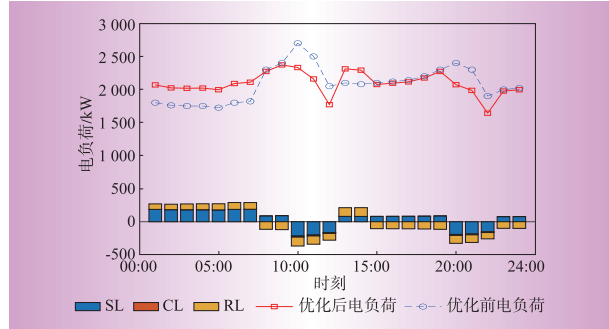


图4 场景2需求响应前后的电力负荷曲线

Fig. 4 Power load curves before and after demand response in scenario 2

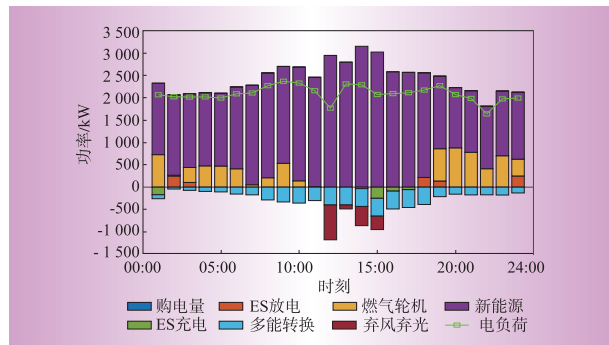


图5 场景2优化后的电力负荷分布

Fig. 5 Optimized power load distribution in scenario 2

表2 各场景用户满意度

Table 2 User satisfaction in each scene

场景	用户用电满意度	电费支出满意度
1	0.919 7	0.922 0
2	0.910 7	0.910 8

由表2可知,与考虑电储能需求响应相比,考虑多能转换的需求响应的用户用电满意度与电费支出满意度较低。原因可能是多能转换替代了原本一部分的电能使用,使得用户对系统的能源供应满意度降低。

### 5.3 分析总结

本文基于多能转换所带来的能源时空平移特性,并结合用户侧需求响应,实现了平滑综合能源系统负荷曲线、极大地提高综合能源系统风光消纳能力的目标,所得结论如下:

(1) 与传统蓄电池储能相比,多能转换所体现的电能存储的特性,可调整系统的能源供应曲线,极大地提高了系统消纳风光的能力,为解决大规模可再生能源并网问题提供了更多的解决思路。

(2) 本文所建立的系统优化调度模型能够充分计及多能转换与电力需求响应的有效配合,通过多能转换与需求响应协调了系统的供能侧和负荷侧,平滑了系统的负荷曲线,提高了系统消纳风光的能力,大大降低了外购能源成本,有利于提高系统运行的稳定性和经济性。

## 6 结束语

本文对考虑多能转换的电力需求响应技术开展了研究,具体成果总结如下:

(1) 详细梳理了多能转换的相关研究现状,通过研究电力负荷中的电采暖、电转气、冰蓄冷等典型多能转换案例,考虑转换效率,并针对其他能源形式的存储特性,研究提出电力负荷多能转换的模型,分析由此形成的电能存储特性。建立了多能转换相关模型,从多能转换系统输入、转换、输出3个方面建立模型,实现了以电为核心的多能转换,提高了能源的利用效率。

(2) 研究了考虑多能转换技术对系统经济稳定运行的优化作用,从能量平衡约束、多能转换设备约束、储能设备约束和用户用电满意度约束4个方面,对系统建模进行统一规划,确保系统运行的稳定性,考虑系统的购能成本以及设备维运成本,以最低综合成本为目标函数,优化系统运行的经济性。D

## 参考文献:

- [1] 卫志农,张思德,孙国强,等. 计及电转气的电-气互联综合能源系统削峰填谷研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4 601-4 609.  
WEI Zhinong, ZHANG Side, SUN Guoqiang, et al. Power-to-gas considered peak load shifting research for integrated electricity and natural-gas energy systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4 601-4 609.
- [2] 李兵,牛洪海,陈俊,等. 多能互补综合能源系统运行优化研究[J]. 分布式能源, 2018, 3(2): 53-57.  
LI Bing, NIU Honghai, CHEN Jun, et al. Optimal operation of multi-energy collaboration system [J]. Distributed Energy, 2018, 3(2): 53-57.
- [3] 崔杨,修志坚,刘闯,等. 计及需求响应与火-储深度调峰定价策略的电力系统双层优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4 403-4 414.  
CUI Yang, XIU Zhijian, LIU Chuang, et al. Dual level optimal dispatch of power system considering demand response and pricing strategy on deep peak regulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4 403-4 414.
- [4] 龚凌霄,刘天琪,何川,等. 考虑综合需求响应的气电联合系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 39-47.  
GONG Lingxiao, LIU Tianqi, HE Chuan, et al. Reliability evaluation of integrated electricity and natural-gas system considering integrated demand response [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 39-47.
- [5] 李湃,黄越辉,张金平,等. 多能互补发电系统电/热/氢储能容量协调优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(13): 5 158-5 169.  
LI Pai, HUANG Yuehui, ZHANG Jinping, et al. Capacity

coordinated optimization of battery, thermal and hydrogen storage system for multi-energy complementary power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(13): 5 158-5 169.

- [6] 李昊,刘畅,苗博,等. 考虑冷热电互补及储能系统的多园区综合能源系统协调优化调度[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(5): 1 482-1 491.  
LI Hao, LIU Chang, MIAO Bo, et al. Coordinative optimal dispatch of multi-park integrated energy system considering complementary cooling, heating and power and energy storage systems [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(5): 1 482-1 491.
- [7] 丁涛,牟晨璐,别朝红,等. 能源互联网及其优化运行研究现状综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4 318-4 328.  
DING Tao, MU Chenlu, BIE Chaohong, et al. Review of energy Internet and its operation [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4 318-4 328.
- [8] 罗纯坚,李姚旺,许汉平,等. 需求响应不确定性对日前优化调度的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 22-29.  
LUO Chunjian, LI Yaowang, XU Hanping, et al. Influence of demand response uncertainty on day-ahead optimization dispatching [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 22-29.
- [9] 崔杨,张汇泉,仲悟之,等. 计及价格型需求响应及CSP电站参与的风电消纳日前调度[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 183-191.  
CUI Yang, ZHANG Huiquan, ZHONG Wuzhi, et al. Day-ahead scheduling considering participation of price-based demand response and CSP plant in wind power accommodation [J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 183-191.
- [10] 魏震波,任小林,黄宇涵. 考虑综合需求侧响应的区域综合能源系统多目标优化调度[J]. 电力建设, 2020, 41(7): 92-99.  
WEI Zhenbo, REN Xiaolin, HUANG Yuhan. Multi-objective optimal dispatch for integrated energy system considering integrated demand response [J]. Electric Power Construction, 2020, 41(7): 92-99.
- [11] ZHU X, SUN Y, YANG J, et al. Day-ahead energy pricing and management method for regional integrated energy systems considering multi-energy demand responses [J]. Energy, 2022, 251.
- [12] 李鹏,吴迪凡,李雨薇,等. 基于综合需求响应和主从博弈的多微网综合能源系统优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1 307-1 321.  
LI Peng, WU Difan, LI Yuwei, et al. Optimal dispatch of multi-microgrids integrated energy system based on integrated demand response and stackelberg game [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1 307-1 321.
- [13] 魏震波,黄宇涵. 计及需求侧管理的多电-气互联综合能源系统分散协调调度[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 277-285.  
WEI Zhenbo, HUANG Yuhan. Decentralized coordinated dispatch for multiple integrated electricity-gas energy systems considering demand side management [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 277-285.
- [14] 江岳春,曾诚玉,郇嘉嘉,等. 计及人体舒适度和柔性负荷的综合能源协同优化调度[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 254-260.  
JIANG Yuechun, ZENG Chengyu, HUAN Jiajia, et al. Integrated energy collaborative optimal dispatch considering human comfort and flexible load [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 254-260.

(责任编辑 孙晶 汤丽莉)