

# 基于改进雷达图模型的热电联供型微网系统 多目标优化配置

赵建勇<sup>1,2</sup>, 年珩<sup>1,2</sup>, 马润生<sup>3</sup>, 宋晓童<sup>3</sup>, 石生超<sup>3</sup>, 范彩兄<sup>3</sup>, 庞博<sup>1,2</sup>

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江杭州 310027; 2. 浙江省电机系统智能控制与变流技术重点实验室, 浙江杭州 310027; 3. 国网青海省电力公司电力科学研究院, 青海西宁 810008)

**摘要:**针对热电联供型微网系统的容量配置问题,提出了一种基于改进雷达图模型的多目标优化配置方法。首先,提出含有光伏光热(PV/T)单元、变流器、储电单元、热泵、电锅炉、储热单元及电、热负荷的微网结构,并选取了5个优化目标,用于全面表征热电联供型微网系统的供电可靠性、供热可靠性、经济性和可再生能源利用情况。其次,建立了多目标的改进雷达图模型,并基于扇形面积和周长构造了适应度函数。然后,为保证微网系统的电、热稳定供应,给出了约束条件,从而建立了以最大化适应度函数为目标的优化配置模型,并通过优化执行过程,求解得到综合性能最优的微网系统容量配置结果。最后,根据青海省偏远地区的案例分析,验证了提出的多目标优化配置方法的有效性。

**关键词:**雷达图模型;热电联供型微网系统;多目标优化配置;适应度函数

**中图分类号:**TM 73;TK 01

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202011018

## 0 引言

对于大电网难以覆盖的偏远地区,“供电难”“供热难”已成为困扰当地居民生活的突出问题,但这类地区太阳能、风能等可再生能源通常较为丰富。由于微网系统具有高效利用可再生能源、环境的友好性以及工作模式灵活等优点<sup>[1-2]</sup>,建设采用孤岛运行模式的微网系统,已成为解决偏远地区能源供应问题的一种有效途径<sup>[3-4]</sup>。为解决偏远地区的供电问题,微网系统需包含光伏、风电等可再生能源发电单元和储电单元,并长期处于孤岛运行模式,对功率潮流进行自我调控。与此同时,针对偏远地区的供热问题,在原有微网系统的基础上,增加不同形式的产热单元、电热转换单元及储热单元,实现热电联供<sup>[5-6]</sup>。热电联供作为一种典型、高效的供能方式,具有节能、环保、高效、削峰填谷、能源利用率高等优点,因而得到了极大关注。文献[7-9]给出了多种热电联供系统的实施方案,能够有效提高能源的利用效率,同时为多种负荷形式进行供能。

从功能角度,热电联供型微网系统可划分为电力系统层和热力系统层;从系统组成角度,其主要由可再生能源利用单元、储电单元、电热转换单元和储热单元等构成。而上述单元的容量配置极大程度上影响着微网系统的供能特性<sup>[10]</sup>。因此,为保证热电联供型微网系统的安全可靠运行,并满足可再生能源利用、经济成本及电、热负荷供应等要求,需要对

微网系统组成进行多目标的容量优化配置。目前,已有学者对微网系统和综合能源系统的配置优化展开了研究。文献[11]提出了一种基于文化基因算法的交直流混合微电网优化运行方法,但该方法仅采用权重法计算优化目标函数,难以适用于热电联供型微网系统负荷种类多、优化指标复杂的工况。文献[12]针对光热电站热电联供型微网,提出了计及需求响应的微网优化运行方法,并能够有效提升微网的运行效益。文献[13]进一步以最小化经济成本为优化目标,提出了一种计及需求响应和热/电耦合的微网能源优化规划方法。但上述方法中,优化指标较少、优化目标函数设计简单,难以全面表征热电联供型微网系统的综合特性。在综合能源系统规划方面,文献[14]基于小型生物质沼气冷热电联供系统,建立了综合能源经济和环境效益的多目标优化模型。文献[15]针对冷热电联供系统的最佳容量配置,给出了全面的多评价准则和多目标优化算法。文献[16]综合考虑了能源购买成本、冷热电负荷特性及设备出力,建立了风光气储互补发电的冷热电联供优化协调模型。基于此,对热电联供型微网系统容量进行优化建模时,需考虑对设备、负荷等的约束,且目标选取要全面反映系统的综合性能。

基于上述研究成果可以发现,当前对于微电网或热电联供型综合能源系统的规划问题,其主流解决方法为综合考虑规划配置成本及运行成本,首先建立一个统一的数学优化模型,然后采用单目标或多目标数学优化方法进行计算,从而产生包含规划配置方案及运行策略在内的最优规划结果。有时,为简化数学优化模型,可首先明确微电网或热电联

收稿日期:2020-03-26;修回日期:2020-09-11

基金项目:国网青海省电力公司科技项目(106000003069)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Qinghai Electric Power Company(106000003069)

供型综合能源系统的运行策略,如针对孤岛型微电网,可以采用负荷跟踪管理策略。该运行策略逻辑简单,可优先满足负荷的供能要求,但由于需要大量的判断环节及分离求解的方程,存在难以保证最优解以及无法保证规划方案位于多目标优化帕累托前沿的缺陷。此外,针对热电联供型微网系统的多目标优化问题,雷达图法是一种典型的数值与图形相结合的评估方法,可用于得到合理的优化目标函数<sup>[17]</sup>。然而,在传统的雷达图模型中,各优化目标之间存在信息的共用问题,并且各目标的排列顺序不同,雷达图的面积、周长也不一样,容易造成优化结果的不一致<sup>[18]</sup>,难以直接应用。

在上述文献的基础上,本文针对热电联供型微网系统的容量配置问题,提出了一种基于改进雷达图模型的多目标优化配置方法。首先,提出含有光伏光热(PV/T)单元、变流器、储电单元、热泵、电锅炉、储热单元及电、热负荷的微网结构,并选取了5个优化目标,用于全面表征热电联供型微网系统的供电可靠性、供热可靠性、经济性和可再生能源利用情况。其次,建立了多目标的改进雷达图模型,并基于扇形面积和周长构造了适应度函数。然后,为保证微网系统的电、热稳定供应,给出了约束条件,从而建立了以最大化适应度函数为目标的优化配置模型,并通过优化执行过程,求解得到综合性能最优的微网系统容量配置结果。最后,根据对青海省偏远地区的案例分析,验证了提出的多目标优化配置方法的有效性。

## 1 热电联供型微网系统结构

图1给出了热电联供型微网系统的示意图,PV/T单元作为微网能量来源,可将太阳能同时转化为电能和热能。PV/T单元产生的电能经储电单元、变流器和用户电负荷构成了微网电力系统层,从而实现用户的电能供应;PV/T单元产生的热能配合热泵使用<sup>[19]</sup>,电锅炉作为补充热源,与热泵、储热单元和用户热负荷构成了微网热力系统层,从而实现用户的热能供应。在热力系统层中,需配置相应的水循环系统,将热泵和电锅炉产生的热量经热力

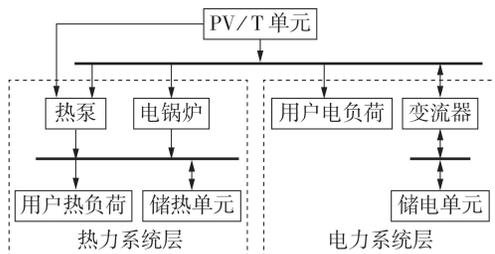


图1 热电联供型微网系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of combined heat and power microgrid system

管网传输给储热单元和用户热负荷,或在热泵和电锅炉产热难以满足用户热负荷需求时,将储热单元存储的热量经热力管网传输给用户热负荷<sup>[20]</sup>。本文中,该热电联供型微网系统主要应用于没有大电网覆盖的青海省偏远村庄,因此基于孤岛运行工况进行微网容量配置。

## 2 热电联供型微网系统的多目标选取

针对图1所示的热电联供型微网系统,从供电可靠性、供热可靠性、经济性和可再生能源利用情况4个方面,选取以下5个优化目标,用于电力系统层和热力系统层的容量优化配置。

(1) 负荷失电率 LPSP (Loss of Power Supply Probability) 值  $L_{psp}$  用于表征电力供应的可靠性<sup>[10]</sup>。

$$L_{psp} = \frac{\sum_{t=1}^T p(P_{sue}(t) < P_{load}(t))}{T} \quad (1)$$

其中,  $P_{sue}(t)$  为  $t$  时刻系统的供电功率;  $P_{load}(t)$  为  $t$  时刻系统的电负荷;  $p(P_{sue}(t) < P_{load}(t))$  等于 0 或者 1, 当  $P_{sue}(t) < P_{load}(t)$  时  $p(P_{sue}(t) < P_{load}(t)) = 1$ , 否则  $p(P_{sue}(t) < P_{load}(t)) = 0$ ;  $T$  为给定的时间长度。

(2) 负荷失热率 LHSP (Loss of Heat Supply Probability) 值  $L_{hsp}$  用于表征热力供应的可靠性<sup>[10]</sup>。

$$L_{hsp} = \frac{\sum_{t=1}^T p(H_{suh}(t) < H_{load}(t))}{T} \quad (2)$$

其中,  $H_{suh}(t)$  为  $t$  时刻系统的供热功率;  $H_{load}(t)$  为  $t$  时刻系统的热负荷;  $p(H_{suh}(t) < H_{load}(t))$  等于 0 或者 1, 当  $H_{suh}(t) < H_{load}(t)$  时  $p(H_{suh}(t) < H_{load}(t)) = 1$ , 否则  $p(H_{suh}(t) < H_{load}(t)) = 0$ 。

(3) 系统年化成本 ASC (Annualized System Cost) 值  $C_{as}$  用于表征系统容量配置的经济性<sup>[10]</sup>。

$$C_{as} = \sum_{j=1}^5 (C_i(j) + C_m(j)) \quad (3)$$

其中,  $C_i(j)$  为系统第  $j$  个单元的初始年化投资成本;  $C_m(j)$  为系统第  $j$  个单元的年化运行维护成本。

(4) 可再生能源发电损失率 LREG (Loss of Renewable Energy Generation) 值  $L_{reg}$  用于表征可再生能源发电功率的利用情况<sup>[10]</sup>。

$$L_{reg} = \frac{\sum_{t=1}^T P_{dump}(t)}{\sum_{t=1}^T P_{pv}(t)} \quad (4)$$

其中,  $P_{dump}(t)$  为  $t$  时刻可再生能源弃电功率;  $P_{pv}(t)$  为  $t$  时刻光伏单元的发电功率。

(5) 能量过剩率 EER (Excessive Energy Rate) 值  $R_{ex}$  用于表征可再生能源容量配置的利用情况<sup>[21]</sup>。

$$R_{ex} = \frac{\sum_{t=1}^T P_{exr}(t)}{\sum_{t=1}^T P_{use}(t)} \quad (5)$$

其中,  $P_{exr}(t)$  为  $t$  时刻系统过剩的能量功率;  $P_{use}(t)$  为

$t$ 时刻系统利用的可再生能源发电功率。

可以看出,上述5个优化目标都采用最小化的优化选项,即优化目标数值越小,则表示系统对应性能越优。

### 3 基于改进雷达图模型的适应度函数计算

#### 3.1 多优化目标的标准化处理

上述优化目标量纲不同且数值数量级差别较大,直接使用会对优化结果的有效性造成影响。此外,最小化的优化选项与雷达图模型的期望结果不一致,且不利于保证优化结果的精度。为消除上述差异对优化结果的影响,需要对优化目标进行标准化处理<sup>[22]</sup>。

对于 $L_{\text{psp}}$ 、 $L_{\text{hsp}}$ 、 $L_{\text{reg}}$ 和 $R_{\text{ex}}$ ,在实际优化过程中,当满足期望值要求时,即认为该优化目标达到最小化。以 $L_{\text{psp}}$ 为例,其期望值 $L_{\text{psp-desire}}$ 设为0.01。当 $L_{\text{psp}} \leq L_{\text{psp-desire}}$ 时,可认为 $L_{\text{psp}}$ 满足供电可靠性要求,达到最小化,因此采用 $\max(0, L_{\text{psp}} - L_{\text{psp-desire}})$ 代替 $L_{\text{psp}}$ 进行标准化处理,具体如下:

$$L_{\text{psp-norm}} = \frac{L_{\text{psp-max}} - \max(0, L_{\text{psp}} - L_{\text{psp-desire}})}{L_{\text{psp-max}} - L_{\text{psp-min}}} \quad (6)$$

其中, $L_{\text{psp-max}}$ 和 $L_{\text{psp-min}}$ 分别为 $\max(0, L_{\text{psp}} - L_{\text{psp-desire}})$ 可能存在的最大值和最小值。

同理,对 $L_{\text{hsp}}$ 、 $L_{\text{reg}}$ 和 $R_{\text{ex}}$ 做如下标准化处理:

$$L_{\text{hsp-norm}} = \frac{L_{\text{hsp-max}} - \max(0, L_{\text{hsp}} - L_{\text{hsp-desire}})}{L_{\text{hsp-max}} - L_{\text{hsp-min}}} \quad (7)$$

$$L_{\text{reg-norm}} = \frac{L_{\text{reg-max}} - \max(0, L_{\text{reg}} - L_{\text{reg-desire}})}{L_{\text{reg-max}} - L_{\text{reg-min}}} \quad (8)$$

$$R_{\text{ex-norm}} = \frac{R_{\text{ex-max}} - \max(0, R_{\text{ex}} - R_{\text{ex-desire}})}{R_{\text{ex-max}} - R_{\text{ex-min}}} \quad (9)$$

其中, $L_{\text{hsp-desire}}$ 为 $L_{\text{hsp}}$ 的期望值,本文取0.01以保证可靠的热力供应; $L_{\text{hsp-max}}$ 和 $L_{\text{hsp-min}}$ 分别为 $\max(0, L_{\text{hsp}} - L_{\text{hsp-desire}})$ 可能存在的最大值和最小值; $L_{\text{reg-desire}}$ 为 $L_{\text{reg}}$ 的期望值,本文取0.04以保证较低的弃光率; $L_{\text{reg-max}}$ 和 $L_{\text{reg-min}}$ 分别为 $\max(0, L_{\text{reg}} - L_{\text{reg-desire}})$ 可能存在的最大值和最小值; $R_{\text{ex-desire}}$ 为 $R_{\text{ex}}$ 的期望值,本文取0以保证高的能源利用率; $R_{\text{ex-max}}$ 和 $R_{\text{ex-min}}$ 分别为 $\max(0, R_{\text{ex}} - R_{\text{ex-desire}})$ 可能存在的最大值和最小值。

由于对 $C_{\text{as}}$ 没有期望值要求,其标准化处理如下:

$$C_{\text{as-norm}} = \frac{C_{\text{as-max}} - C_{\text{as}}}{C_{\text{as-max}} - C_{\text{as-min}}} \quad (10)$$

其中, $C_{\text{as-max}}$ 和 $C_{\text{as-min}}$ 分别为 $C_{\text{as}}$ 可能存在的最大值和最小值。

注意到 $L_{\text{psp-norm}}$ 、 $L_{\text{hsp-norm}}$ 、 $C_{\text{as-norm}}$ 、 $L_{\text{reg-norm}}$ 和 $R_{\text{ex-norm}}$ 的优化选项变为最大化。

#### 3.2 确定改进雷达图扇形区域的角度

为解决传统雷达图模型中信息共用及优化目标排列顺序选取的问题,本文采用改进雷达图模型来进行适应度函数的计算。

(1)利用主观权重法确定各优化目标权重。

本文采用G1法<sup>[23]</sup>计算主观权重,基本步骤如下。

步骤1:根据专家经验判断各优化目标的相对重要性,并将各优化目标按重要程度大小进行排序后从而得到 $L_{\text{psp}} = L_{\text{hsp}} > C_{\text{as}} > L_{\text{reg}} = R_{\text{ex}}$ 。

步骤2:按照专家经验给出的排序结果,确定相邻两优化目标的相对重要程度之比,并记为 $r_k$ 。

$$r_k = \frac{X_{k-1}}{X_k} \quad k = 2, 3, 4, 5 \quad (11)$$

其中, $r_k$ 根据专家经验进行赋值, $r_k$ 为1.0表示 $X_{k-1}$ 和 $X_k$ 同样重要, $r_k$ 为1.2、1.4、1.6分别表示 $X_{k-1}$ 比 $X_k$ 稍微重要、明显重要和强烈重要, $r_k$ 为1.1、1.3、1.5分别表示 $X_{k-1}$ 比 $X_k$ 介于同样重要与稍微重要、稍微重要与明显重要、明显重要与强烈重要之间。

步骤3:根据步骤2确定的相对重要程度之比 $r_k$ ,可计算各优化目标的权重如下:

$$\begin{cases} w_{k-1} = r_k w_k & k = 2, 3, 4, 5 \\ w_5 = (1 + r_2 r_3 r_4 r_5 + r_3 r_4 r_5 + r_4 r_5 + r_5)^{-1} \end{cases} \quad (12)$$

其中, $w_k$ 为第 $k$ 个优化目标的权重。

(2)确定优化目标在雷达图中对应的扇形区域角度。

根据各优化目标对应的权重,计算在雷达图中对应扇形区域的角度如下:

$$\theta_i = 2\pi w_i \quad i = 1, 2, \dots, 5 \quad (13)$$

其中, $\theta_i$ 为第 $i$ 个优化目标对应的扇形区域角度。

根据上述方法,得到本文中各优化目标的相对重要程度之比、目标权重及扇形区域的角度如表1所示。

表1 各优化目标的相对重要程度之比、权重及扇形区域的角度

Table 1 Ratios of relative importance, weights and sector angles of optimization objectives

参数	数值	参数	数值
$r_2$	$L_{\text{psp}}/L_{\text{hsp}}=1.0$	$w_4$	0.1524
$r_3$	$L_{\text{hsp}}/C_{\text{as}}=1.4$	$w_5$	0.1524
$r_4$	$C_{\text{as}}/L_{\text{reg}}=1.2$	$\theta_1 / \text{rad}$	1.6091
$r_5$	$L_{\text{reg}}/R_{\text{ex}}=1.0$	$\theta_2 / \text{rad}$	1.6091
$w_1$	0.2561	$\theta_3 / \text{rad}$	1.1492
$w_2$	0.2561	$\theta_4 / \text{rad}$	0.9576
$w_3$	0.1829	$\theta_5 / \text{rad}$	0.9576

#### 3.3 绘制改进雷达图

改进雷达图绘制过程如下。

步骤1:作单位圆,从圆心 $O$ 引射线 $OA$ ,交单位圆于点 $A$ ,从 $OA$ 出发,按照优化目标权重从大到小的顺序以及对应扇形区域的角度,按逆时针方向依次绘出其余4条射线 $OB$ 、 $OC$ 、 $OD$ 、 $OE$ ,从而得到5个优化目标对应的扇形区域 $AOB$ 、 $BOC$ 、 $COD$ 、 $DOE$ 、 $EOA$ 。

步骤2:分别作各扇形区域的对角线,与单位圆依次交于点 $F_1$ — $F_5$ ,并将 $OF_1$ — $OF_5$ 作为各优化目标的指标轴。

步骤3:将标准化后的优化目标按数值大小在指标轴上标出相应的点,依次可得到点 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$ 并相连,得到多边形 $abcde$ ,进而建立改进的雷达图模型,如图2所示。

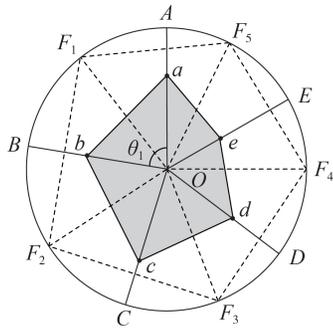


图2 改进雷达图模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of improved radar chart model

### 3.4 计算适应度函数

根据图2可得到改进雷达图中多边形 $abcde$ 的面积 $S$ 和周长 $L$ 为:

$$\begin{cases} S = \frac{1}{2} \left( \sum_{i=1}^4 l_i l_{i+1} \sin \frac{\theta_i + \theta_{i+1}}{2} + l_1 l_5 \sin \frac{\theta_1 + \theta_5}{2} \right) \\ L = \sum_{i=1}^4 \sqrt{l_i^2 + l_{i+1}^2 - 2l_i l_{i+1} \cos \frac{\theta_i + \theta_{i+1}}{2}} + \sqrt{l_1^2 + l_5^2 - 2l_1 l_5 \cos \frac{\theta_1 + \theta_5}{2}} \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $i \in \{1, 2, 3, 4\}$ ;  $l_1$ — $l_5$ 分别表示 $L_{\text{psp-norm}}$ 、 $L_{\text{hsp-norm}}$ 、 $C_{\text{as-norm}}$ 、 $L_{\text{reg-norm}}$ 和 $R_{\text{ex-norm}}$ 。

由此,定义基于改进雷达图模型的适应度函数表达式如下:

$$F = \sqrt{SL} \quad (15)$$

## 4 热电联供型微网系统的约束条件

为保证微网系统的安全可靠运行,并满足偏远地区的电、热负荷需求,建立约束条件如下。

(1)系统功率平衡约束。

系统功率平衡约束包括系统电、热功率平衡约束:

$$\begin{cases} P_{\text{pvt}}(t) = P_{\text{sue}}(t) + P_{\text{bat}}(t) + P_{\text{boi}}(t) + P_{\text{pum}}(t) + P_{\text{dump}}(t) \\ H_{\text{pum}}(t) + H_{\text{boi}}(t) = H_{\text{sh}}(t) + H_{\text{sto}}(t) + H_{\text{loss}}(t) \end{cases} \quad (16)$$

其中, $P_{\text{pvt}}(t)$ 为 $t$ 时刻PV/T单元的发电功率; $P_{\text{bat}}(t)$ 为 $t$ 时刻储电单元的充放电功率; $P_{\text{boi}}(t)$ 为 $t$ 时刻电锅炉消耗的电功率; $P_{\text{pum}}(t)$ 为 $t$ 时刻热泵消耗的电功率; $P_{\text{dump}}(t)$ 为 $t$ 时刻光伏弃电功率; $H_{\text{pum}}(t)$ 为 $t$ 时刻热泵的产热功率; $H_{\text{boi}}(t)$ 为 $t$ 时刻电锅炉的产热功率; $H_{\text{sto}}(t)$ 为 $t$ 时刻储热单元的吸热或放热功率; $H_{\text{loss}}(t)$ 为 $t$ 时刻水循环系统的热损失功率。

为简化分析,本文采用平均能效比(COP)来近似约束热泵或电锅炉的产热功率与其消耗的电功率之间的关系<sup>[19]</sup>,即 $P_{\text{pum}}(t)$ 、 $P_{\text{boi}}(t)$ 、 $H_{\text{pum}}(t)$ 、 $H_{\text{boi}}(t)$ 满足:

$$H_{\text{pum}}(t) = f_{\text{COPpum}} P_{\text{pum}}(t) \quad (17)$$

$$H_{\text{boi}}(t) = f_{\text{COPboi}} P_{\text{boi}}(t) \quad (18)$$

其中, $f_{\text{COPpum}}$ 为热泵的平均能效比值; $f_{\text{COPboi}}$ 为电锅炉的平均能效比值。

考虑到热泵的产热功率受到PV/T单元集热功率的限制<sup>[19]</sup>,即:

$$H_{\text{pum}}(t) \leq H_{\text{pvt}}(t) \quad (19)$$

其中, $H_{\text{pvt}}(t)$ 为 $t$ 时刻PV/T单元的集热功率。

此外, $H_{\text{loss}}(t)$ 的表达式如下<sup>[20]</sup>:

$$H_{\text{loss}}(t) = \sum_{i=1}^M G_i C_p \Delta T_i = H_{\text{loss1}}(t) + H_{\text{loss2}}(t) \quad (20)$$

其中, $G_i$ 为第 $i$ 段水循环系统热力管道内水质量流量; $M$ 为总段数; $C_p$ 为水的质量比热; $\Delta T_i$ 为第 $i$ 段水循环系统热力管道进出水口的温度差; $H_{\text{loss1}}(t)$ 为 $t$ 时刻向热负荷供热过程对应的热损失功率; $H_{\text{loss2}}(t)$ 为 $t$ 时刻向储热单元供热过程对应的热损失功率。在热电联供型微网中,考虑到热泵、电锅炉与储热单元安装距离很近,可近似认为热负荷或储热单元获得单位供热功率对应的热损失功率固定,且热负荷获得单位供热功率对应的热损失功率明显更大。

根据式(16),可得到式(5)中 $P_{\text{exr}}(t)$ 和 $P_{\text{use}}(t)$ 计算表达式如下:

$$\begin{cases} P_{\text{exr}}(t) = P_{\text{dump}}(t) \\ P_{\text{use}}(t) = P_{\text{sue}}(t) + P_{\text{bat}}(t) + P_{\text{boi}}(t) + P_{\text{pum}}(t) \end{cases} \quad (21)$$

(2)储电单元的容量约束。

$$S_{\text{SOCmin}} \leq S_{\text{SOC}}(t) \leq S_{\text{SOCmax}} \quad (22)$$

其中, $S_{\text{SOC}}(t)$ 为 $t$ 时刻储电单元的荷电量, $S_{\text{SOCmin}}$ 和 $S_{\text{SOCmax}}$ 分别为其最小和最大荷电量,且 $S_{\text{SOCmin}} = 0.3S_{\text{SOCrate}}$ , $S_{\text{SOCmax}} = 0.9S_{\text{SOCrate}}$ , $S_{\text{SOCrate}}$ 为储电单元的额定荷电量。

(3)储电单元的充放电功率约束。

$$-P_{\text{bat-max}} \leq P_{\text{bat}}(t) \leq P_{\text{bat-max}} \quad (23)$$

其中, $P_{\text{bat-max}}$ 为储电单元的最大充放电功率,其受到变流器额定功率 $P_{\text{converter}}$ 的限制。当储电单元充电时, $P_{\text{bat}}(t) > 0$ ;当储电单元放电时, $P_{\text{bat}}(t) \leq 0$ 。

(4) 储热单元的容量约束。

$$0 \leq Q(t) \leq Q_{\text{rate}} \quad (24)$$

其中,  $Q(t)$  为  $t$  时刻储热单元的储热量;  $Q_{\text{rate}}$  为储热单元的额定储热量<sup>[20]</sup>。

(5) 储热单元的吸 / 放热功率约束。

$$-H_{\text{out-max}} \leq H_{\text{sto}}(t) \leq H_{\text{in-max}} \quad (25)$$

其中,  $H_{\text{in-max}}$  为储热单元的最大吸热功率,  $H_{\text{out-max}}$  为储热单元的最大放热功率, 其受到储热单元换热器传热功率的限制, 不得超过换热器的最大传热功率。当储热单元吸热时,  $H_{\text{sto}}(t) > 0$ ; 当储热单元放热时,  $H_{\text{sto}}(t) \leq 0$ 。

(6) 储电单元的效率约束。

$$S_{\text{soc}}(t) = S_{\text{soc}}(t-1) + \alpha P_{\text{bat}}(t) \Delta t \quad (26)$$

$$\alpha = \begin{cases} \eta_c & P_{\text{bat}}(t) > 0 \\ 1/\eta_d & P_{\text{bat}}(t) \leq 0 \end{cases}$$

其中,  $\eta_c$  为储电单元的充电效率;  $\eta_d$  为储电单元的放电效率;  $\Delta t$  为时间间隔。

## 5 优化配置模型及执行过程

基于上述的优化目标、适应度函数及约束条件, 以最大化适应度函数为优化配置目标, 可建立热电联供型微网系统的容量优化配置模型为:

$$\begin{cases} \max F \\ \text{s.t. } g \leq 0 \end{cases} \quad (27)$$

其中,  $g \leq 0$  为热电联供型微网系统的约束条件。

本文采用遗传算法 GA (Genetic Algorithm)<sup>[24]</sup> 对热电联供型微网系统容量优化配置模型进行求解, 优化执行过程如下。

步骤 1: 数据输入。输入青海省偏远地区 PV/T 单元输出功率、电负荷和热负荷数据, 从而确定热电联供型微网系统各组成单元的最大可执行范围。

步骤 2: 条件假设。为保证储电单元与储热单元能够很好地模拟一般性的日运行过程, 在初始时刻  $t=0$  与终止时刻  $t=T$  时, 储电单元的荷电量应满足:

$$S_{\text{soc}}(0) = S_{\text{soc}}(T) \quad (28)$$

同理, 在初始时刻  $t=0$  与终止时刻  $t=T$  时, 储热单元的储热量应满足:

$$Q(0) = Q(T) \quad (29)$$

式(28)和式(29)中, 初始时刻的荷电量与储热量需留有一定的充 / 放电、吸 / 放热裕度。

步骤 3: 负荷跟踪管理策略。考虑到本文中热电联供型微网系统处于孤岛工况, 为确保用户电、热的稳定供应, 其采用负荷跟踪管理策略运行。

根据负荷的变化规律, 对微网系统中电力系统层与热力系统层的功率及能量状态同时进行调控,

其中热力系统层供热优先级为 PV/T-热泵单元 > 储热单元 > 电锅炉; 热力系统层负荷优先级为热负荷 > 储热单元; 电力系统供电优先级为 PV/T 单元 > 储电单元; 电力系统层负荷优先级为热泵 = 电锅炉 > 电负荷 > 储电单元。

附录图 A1 和图 A2 给出了热电联供型微网系统的负荷管理策略流程图, 共包含以下 3 个环节: 满足热负荷需求时热力系统层参考功率计算环节, 电力系统层负荷跟踪环节, 热力系统层负荷跟踪环节。在遗传算法中, 针对种群的每一个体, 都需要进行负荷跟踪管理策略操作, 从而得到该个体对应的各优化目标及适应度  $F$  值。其中, 对储热单元储热 / 放热决策的判据说明如下。

首先, 根据种群中某一个体 PV/T 和热泵单元的容量配置, 计算该个体 PV/T-热泵装置可能的最大产热功率, 表达式如下:

$$H_{\text{pum}}^*(t) = \min(H_{\text{pvt}}(t), H_{\text{pum-max}}(t)) \quad (30)$$

其中,  $H_{\text{pum}}^*(t)$  为  $t$  时刻 PV/T-热泵装置可能的最大产热功率;  $H_{\text{pum-max}}(t)$  为  $t$  时刻热泵装置可能的最大产热功率。

然后, 根据  $H_{\text{pum}}^*(t)$ 、实际热负荷功率  $H_{\text{load}}(t)$  及对应的热损失功率  $H_{\text{loss1}}(t)$  可判断下一时刻储热单元是否进行储热或放热操作。

(1) 若  $H_{\text{pum}}^*(t) > H_{\text{load}}(t) + H_{\text{loss1}}(t)$ , 储热单元应进行储热操作。此时, 需进一步判断储热单元储热量是否到达额定储热量, 若  $Q(t) < Q_{\text{rate}}$ , 则表示储热单元可以进行储热; 否则, 表示储热单元已充满。

(2) 若  $H_{\text{pum}}^*(t) \leq H_{\text{load}}(t) + H_{\text{loss1}}(t)$ , 储热单元应进行放热操作。此时, 需进一步判断储热单元储热量是否为 0, 若  $Q(t) > 0$ , 则表示储热单元可以进行放热; 否则, 表示储热单元已放热完全。

相应地, 对储能单元储电 / 放电决策的判据说明如下。

首先, 根据种群中某一个体的 PV/T 单元发电功率  $P_{\text{pvt}}(t)$ 、电负荷  $P_{\text{load}}(t)$  以及热力系统层当前容量配置下热泵参考电功率  $P_{\text{pum}}^*(t)$  和电锅炉参考电功率  $P_{\text{boi}}^*(t)$ , 可判断下一时刻储电单元是否进行储电或放电操作。

(1) 若  $P_{\text{pvt}}(t) > P_{\text{load}}(t) + P_{\text{pum}}^*(t) + P_{\text{boi}}^*(t)$ , 储电单元应进行储电操作。此时, 需进一步判断储电单元荷电量是否达到最大荷电量  $S_{\text{socmax}}$ , 若  $S_{\text{soc}}(t) < S_{\text{socmax}}$ , 则表示储电单元可以进行储电; 否则, 表示储电单元已充满。

(2) 若  $P_{\text{pvt}}(t) \leq P_{\text{load}}(t) + P_{\text{pum}}^*(t) + P_{\text{boi}}^*(t)$ , 储电单元应进行放电操作。此时, 需进一步判断储电单元荷电量是否大于最小荷电量  $S_{\text{socmin}}$ , 若  $S_{\text{soc}}(t) > S_{\text{socmin}}$ , 则表示储电单元可以进行放热; 否则, 表示储电单元已

放电完全。

步骤4:热电联供型微网系统进行迭代操作。

设定种群个数为400,最大进化代数为400,交叉概率为0.4,变异概率为0.01,进行迭代求解,从而得到热电联供型微网系统综合性能最优的容量配置结果。

## 6 算例分析

为了验证所提多目标配置优化方法的有效性,本文根据青海省某偏远村庄的光伏、负荷数据进行算例分析。算例中,该偏远村庄夏季典型日的最大电负荷为720 kW,最大热负荷为564 kW;冬季典型日的最大电负荷为746 kW,最大热负荷为1 128 kW。图3给出了该偏远村庄夏季典型日和冬季典型日1 MW PV/T单元发电功率、电负荷和热负荷的预测变化曲线。参考文献[25],本文设定PV/T单元的光电转换效率为15%、光热转换效率为22%。微网系统示意图如图1所示,储电单元采用锂离子电池,储热单元采用熔融盐相变储热。附录表A1给出了该热电联供型微网系统各组成单元的成本。其中水循环装置容量直接由典型日最大热负荷功率进行配置,无需对其进行优化,故表A1未给出水循环装置容量。

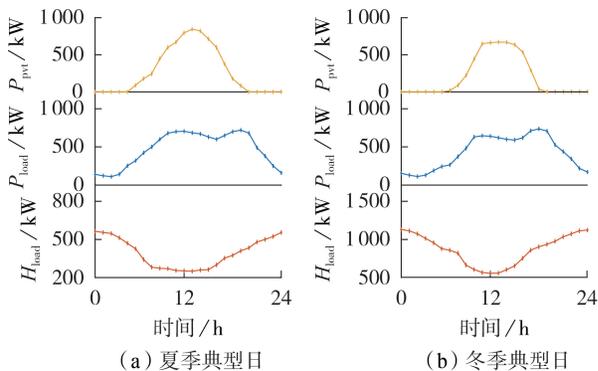


图3 某偏远地区夏季、冬季典型日1 MW PV/T单元发电功率、电负荷、热负荷的预测波形

Fig.3 Forecasting waveforms of 1 MW PV/T unit output power,electricity load and heat load under typical summer and winter days in remote village

### 6.1 多目标优化配置算例分析

根据该偏远村庄夏季典型日PV/T单元发电功率和负荷的预测数据,设定使用期限为20 a,可得热电联供型微网系统的优化配置结果如下:PV/T单元的额定发电功率 $P_{pvt-rate}=2.095$  MW,储电单元数 $N_{bat}=10\ 268$ ,变流器额定电功率 $P_{converter}=1\ 017$  kW,热泵额定电功率 $P_{pum-rate}=249.7$  kW,电锅炉额定电功率 $P_{boi-rate}=313.7$  kW,储热单元额定储热量 $Q_{rate}=10\ 075$  kW·h。此时,各优化目标如下: $L_{nsp}=0, C_{as}=2.736\times 10^6$  元/a, $L_{hsp}=0, R_{ex}=0, L_{reg}=0, F=3.646$ 。

基于该容量配置方案,图4给出了夏季典型日电力系统层和热力系统层的功率和能量变化曲线。由图4(a)可知,在 $[0,9)$  h时段,PV/T单元发电功率难以满足负荷需求,此时储电单元处于放电状态,荷电量降低;在 $[9,17)$  h时段,PV/T单元发电功率明显增加,在满足负荷需求的同时存在剩余电量,储电单元处于充电状态,荷电量增加;在 $[17,24)$  h时段,PV/T单元发电功率逐渐下降为0,储电单元处于放电状态,荷电量降低。可发现电锅炉电功率恒为0,因此热负荷仅由热泵和储热单元进行供热,并且在该容量配置下,未出现弃光现象。由图4(b)可知,在 $[0,5)$  h时段,PV/T单元不进行产热,此时仅由储热单元为热负荷进行供热,储热量降低;在 $[5,8)$  h时段,PV/T-热泵装置产热不足,此时仍主要由储热单元进行供热,储热量降低;在 $[8,18)$  h时段,PV/T单元产热增加,热负荷由热泵进行供热,且存在多余热量由储热单元进行储热,储热量增加;在 $[18,24)$  h时段,此时,PV/T-热泵装置产热逐渐减小为0,热负荷由储热单元进行供热,储热量降低。因此,上述容量配置方案可以有效满足该偏远地区

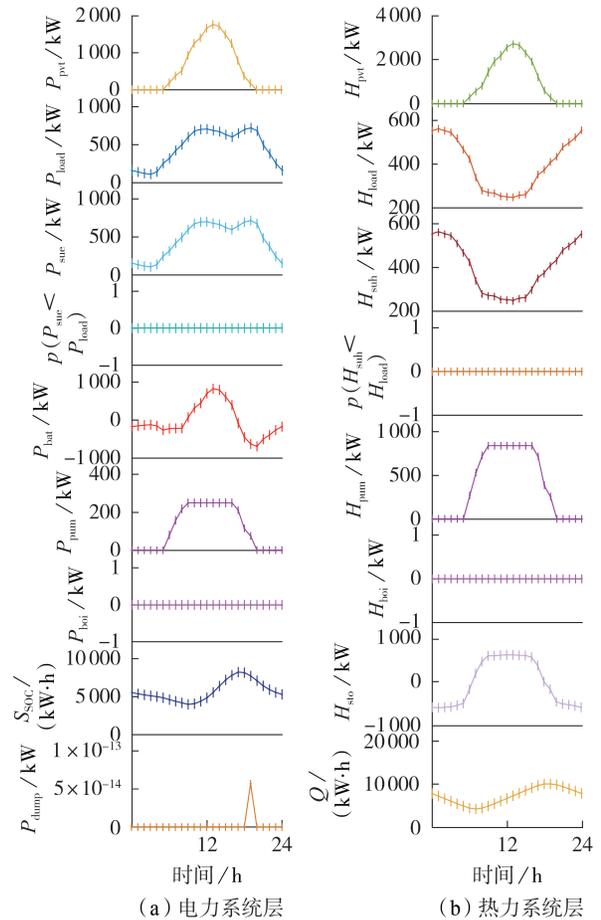


图4 夏季典型日微网电力、热力系统层的功率和能量波形  
Fig.4 Power and energy waveforms in electricity and heat layer of microgrid under typical summer day

夏季典型日的电、热负荷需求,且不存在弃光现象。

根据该偏远村庄冬季典型日 PV/T 发电功率和负荷的预测数据,可得到热电联供型微网系统的优化配置结果如下: $P_{\text{pvt-rate}}=4.381 \text{ MW}$ ,  $N_{\text{bat}}=14\ 290$ ,  $P_{\text{converter}}=1\ 847 \text{ kW}$ ,  $P_{\text{pum-rate}}=810.3 \text{ kW}$ ,  $P_{\text{boi-rate}}=1\ 288 \text{ kW}$ ,  $Q_{\text{rate}}=10\ 196 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。此时,各优化目标如下: $L_{\text{psp}}=0$ ,  $C_{\text{as}}=4.187\times 10^6 \text{ 元/a}$ ,  $L_{\text{hsp}}=0$ ,  $R_{\text{ex}}=0.004\ 6$ ,  $L_{\text{reg}}=0.004\ 6$ ,  $F=3.314$ 。与夏季典型日的优化配置结果相比,由于冬季典型日 PV/T 单元发电功率明显降低而热负荷明显增加,因此各单元容量明显增大。

基于该容量配置方案,图 5 给出了冬季典型日电力系统层和热力系统层的功率和能量变化曲线。由图 5(a)可知,在  $[0, 9) \text{ h}$  时段, PV/T 单元发电功率难以满足负荷需求,此时储电单元处于放电状态,荷电量降低;在  $[10, 17) \text{ h}$  时段, PV/T 单元发电功率明显增加,在满足负荷需求的同时存在剩余电量,因此储电单元处于充电状态,荷电量增加。注意到,在  $[12, 18) \text{ h}$  时段存在一定的弃光现象,但最大弃光功率小于  $80 \text{ kW}$ 。由图 5(b)可知,在  $[0, 7) \text{ h}$  时段, PV/T 单元不进行产热,由电锅炉和储热单元同时

为热负荷进行供热,其中,在  $[0, 3) \text{ h}$  时段,电锅炉和储热单元同时进行产热;在  $[3, 9) \text{ h}$  时段,由于储热单元放热完全,仅由电锅炉为热负荷进行供热。在  $[8, 18) \text{ h}$  时段, PV/T 单元产热增加,热泵开始工作,电锅炉基本不进行产热。此时, PV/T-热泵装置产生的热量在满足热负荷需求时,仍有剩余的热量可进行存储。在  $[19, 24] \text{ h}$  时段, PV/T 单元不再产热,热泵停止工作,主要由储热单元为热负荷供热。因此,上述容量配置方案可以有效满足该偏远地区冬季典型日的电、热负荷需求,并保证较高的能量利用率。

综上所述,基于改进雷达图的多目标优化配置方法对解决热电联供型微网系统的容量配置问题具有很好的适用性。此外,为保证偏远地区全年的电、热可靠供应,该微网系统需采用冬季典型日下的容量优化配置方案。

## 6.2 与单目标容量优化算例的对比分析

为保证偏远地区全年的电、热供应,本节仅给出冬季典型日下单目标容量优化的算例分析。

首先,以  $L_{\text{psp}}$  最小化为优化配置目标,采用所提的优化执行过程,可得到多组不同的容量优化配置结果,其中某一组容量配置方案如下: $P_{\text{pvt-rate}}=7.810 \text{ MW}$ ,  $N_{\text{bat}}=19\ 994$ ,  $P_{\text{converter}}=1\ 620 \text{ kW}$ ,  $P_{\text{pum-rate}}=718.6 \text{ kW}$ ,  $P_{\text{boi-rate}}=146.9 \text{ kW}$ ,  $Q_{\text{rate}}=16\ 403 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。此时,各优化目标如下: $L_{\text{psp}}=0$ ,  $C_{\text{as}}=6.296\times 10^6 \text{ 元/a}$ ,  $L_{\text{hsp}}=0.375\ 0$ ,  $R_{\text{ex}}=1.276$ ,  $L_{\text{reg}}=0.560\ 7$ 。

基于该容量配置方案,图 6 给出了冬季典型日微网系统电力系统层和热力系统层的功率和能量变化情况。由图 6 可知,微网系统存在明显的弃光现象,最大弃光功率接近  $5 \text{ MW}$ ,同时存在失热情况,难以保证可靠的热力供应,且年化成本明显高于基于雷达图的多目标优化结果。

然后,以  $L_{\text{hsp}}$  最小化为优化配置目标,可得到多组不同的容量优化配置结果,其中某一组容量配置方案如下: $P_{\text{pvt-rate}}=5.524 \text{ MW}$ ,  $N_{\text{bat}}=19\ 556$ ,  $P_{\text{converter}}=1\ 848 \text{ kW}$ ,  $P_{\text{pum-rate}}=671.9 \text{ kW}$ ,  $P_{\text{boi-rate}}=1\ 753 \text{ kW}$ ,  $Q_{\text{rate}}=13\ 496 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。此时,各优化目标如下: $L_{\text{psp}}=0$ ,  $C_{\text{as}}=5.523\times 10^6 \text{ 元/a}$ ,  $L_{\text{hsp}}=0$ ,  $R_{\text{ex}}=0.292\ 4$ ,  $L_{\text{reg}}=0.226\ 2$ 。基于该容量配置方案,附录图 A3 给出了冬季典型日微网系统电力系统层和热力系统层的功率和能量变化情况。由图 A3 可知,微网系统存在明显的弃光现象,且不存在失电和失热情况,但年化成本明显高于基于雷达图的多目标优化结果。

以  $C_{\text{as}}$  最小化为优化配置目标,可得到唯一的容量优化配置结果,即各单元容量均为设定的最小值。该算例中,  $C_{\text{as}}$  最小化的容量配置方案如下: $P_{\text{pvt-rate}}=2 \text{ MW}$ ,  $N_{\text{bat}}=10\ 000$ ,  $P_{\text{converter}}=100 \text{ kW}$ ,  $P_{\text{pum-rate}}=100 \text{ kW}$ ,

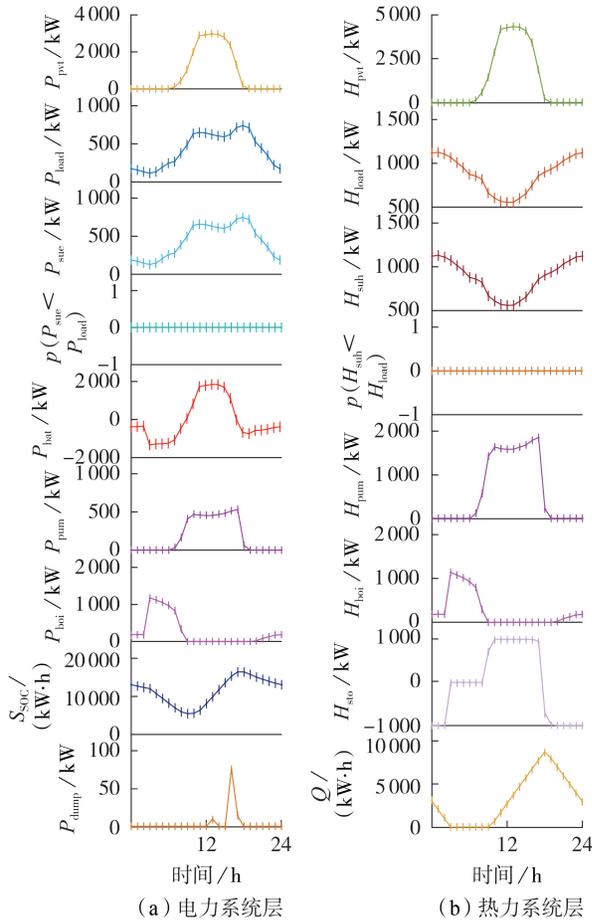


图 5 冬季典型日微网电力、热力系统层的功率和能量波形  
Fig.5 Power and energy waveforms in electricity and heat layer of microgrid under typical winter day

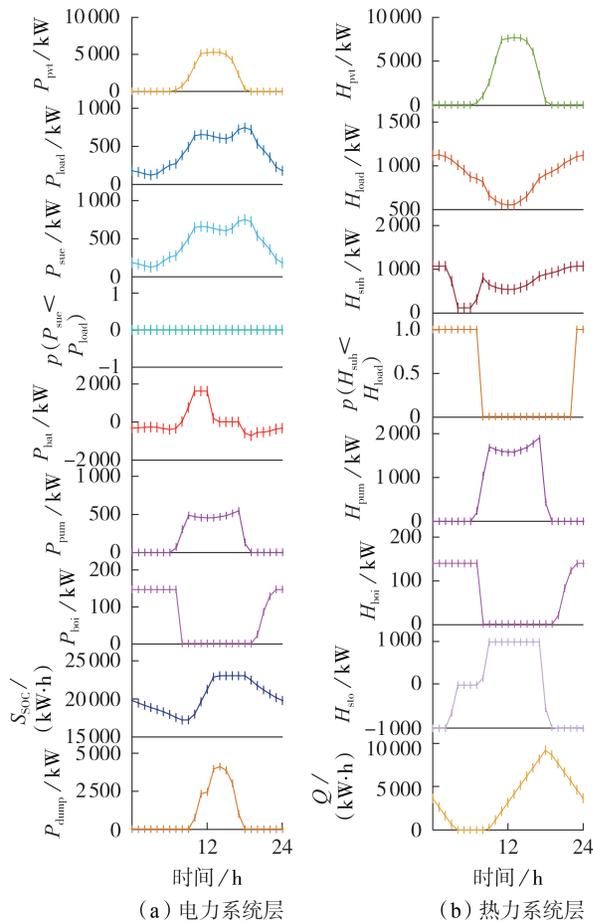


图6  $L_{psp}$ 最小化时微网电力、热力系统层功率和能量波形  
Fig.6 Power and energy waveforms in electricity and heat layer of microgrid with optimization target of minimizing  $L_{psp}$

$P_{boi-rate}=100$  kW,  $Q_{rate}=10\ 000$  kW·h。此时,各优化目标如下: $L_{psp}=0.7083$ ,  $C_{as}=2.6153\times 10^6$  元/a,  $L_{hsp}=1$ ,  $R_{ex}=0.2650$ ,  $L_{reg}=0.2095$ 。基于该容量配置方案,附录图A4给出了冬季典型日微网系统电力系统层和热力系统层的功率和能量变化情况。由图A4可知,虽然微网系统的年化成本明显低于基于雷达图的多目标优化结果,但存在明显弃光现象,失电失热情况严重,不具有实际价值。

以 $L_{reg}$ 最小化为优化配置目标,可得到多组不同的容量优化配置结果,其中某一组容量配置方案如下: $P_{pvt-rate}=2.190$  MW,  $N_{bat}=13\ 014$ ,  $P_{converter}=1\ 499$  kW,  $P_{pump-rate}=531.6$  kW,  $P_{boi-rate}=1\ 321$  kW,  $Q_{rate}=27\ 186$  kW·h。此时,各优化目标如下: $L_{psp}=0.6250$ ,  $C_{as}=3.980\times 10^6$  元/a,  $L_{hsp}=0.5417$ ,  $R_{ex}=0$ ,  $L_{reg}=0$ 。基于该容量配置方案,附录图A5给出了冬季典型日微网系统电力系统层和热力系统层的功率和能量变化情况。由图A5可知,微网系统几乎不存在弃光现象,优化结果正确,但存在失电和失热情况,难以保证负荷的电、热可靠供应。

最后,以 $R_{ex}$ 最小化为优化配置目标,可得到多组

不同的容量优化配置结果,其中某一组容量配置方案如下: $P_{pvt-rate}=2.476$  MW,  $N_{bat}=13\ 370$ ,  $P_{converter}=1\ 551$  kW,  $P_{pump-rate}=1\ 738$  kW,  $P_{boi-rate}=1\ 796$  kW,  $Q_{rate}=21\ 736$  kW·h。此时,各优化目标如下: $L_{psp}=0.5417$ ,  $C_{as}=4.016\times 10^6$  元/a,  $L_{hsp}=0.4583$ ,  $R_{ex}=0$ ,  $L_{reg}=0$ 。基于该容量配置方案,附录图A6给出了冬季典型日微网系统电力系统层和热力系统层的功率和能量变化情况。由图A6可知,微网系统几乎不存在弃光现象,优化结果正确,但存在明显的失电和失热情况。该优化配置结果与 $L_{reg}$ 最小化对应的优化运行结果相似,说明了 $R_{ex}$ 和 $L_{reg}$ 具有一致性。

表2比较了采用单目标和多目标时热电联供型微网系统的优化配置结果。表中,“↓”表示降低(即性能提升);“↑”表示增加(即性能降低)。由表2可知,单目标优化配置结果仅能保证某一个性能指标满足要求,而多目标优化配置结果则可以有效实现微网系统的综合性能优化。以 $L_{psp}$ 最小化的单目标优化配置结果为例,多目标优化配置结果在同样实现 $L_{psp}$ 最小化的同时,其他性能指标( $L_{hsp}$ 、 $C_{as}$ 、 $R_{ex}$ 、 $L_{reg}$ )都有明显提升。此外,与 $L_{reg}$ 或 $R_{ex}$ 最小化的单目标优化配置结果相比,多目标优化配置结果尽管在性能指标 $L_{reg}$ 和 $R_{ex}$ 上降低比例较大,但指标大小依旧很小,即对应高能源利用率。综上可知,所提的基于雷达图模型的多目标优化方法对解决热电联供型微网系统的容量配置问题具有很好的适用性。

表2 单目标与多目标优化配置结果对比

Table 2 Comparison of configuration results between single-objective and multi-objective optimization

多目标结果	单目标结果相较于多目标结果的性能差别				
	$L_{psp}$	$L_{hsp}$	$C_{as}$	$L_{reg}$	$R_{ex}$
$L_{psp}=0$	相等	相等	100%	100%	100%
$L_{hsp}=0$	↓ 100%	相等	↓ 100%	↓ 100%	↓ 100%
$C_{as}=4.187\times 10^6$ 元/a	↓ 33.50%	↓ 24.19%	↑ 60.10%	↑ 5.201%	↓ 4.26%
$L_{reg}=0.0046$	↓ 99.18%	↓ 97.97%	↓ 97.80%	↑ ∞	↑ ∞
$R_{ex}=0.0046$	↓ 99.64%	↓ 98.43%	↓ 98.26%	↑ ∞	↑ ∞

### 6.3 与多目标加权优化算例的对比分析

为进一步验证所提的多目标优化配置方法的实用性,本节给出了多目标加权优化算法的算例分析作为对比。

本节以雷达图模型面积 $S$ 最小化作为优化配置目标(等效于多目标加权算法),采用所提的优化配置过程,可得到多目标加权算法的容量优化配置结果。为保证偏远地区全年的电、热供应,本节仅给

出冬季典型日下容量优化配置方案如下: $P_{\text{pv-rate}}=3.429 \text{ MW}$ ,  $N_{\text{bat}}=10016$ ,  $P_{\text{converter}}=1470 \text{ kW}$ ,  $P_{\text{pum-rate}}=489.4 \text{ kW}$ ,  $P_{\text{boi-rate}}=202.5 \text{ kW}$ ,  $Q_{\text{rate}}=11631 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。此时,各优化目标如下: $L_{\text{psp}}=0$ ,  $C_{\text{as}}=3.179\times 10^6 \text{ 元/a}$ ,  $L_{\text{hsp}}=0.2917$ ,  $R_{\text{ex}}=0$ ,  $L_{\text{reg}}=0$ 。与 6.2 节中的单目标容量优化配置结果相比,采用多目标加权算法可以获得综合性能更优的微网容量配置方案;但与 6.1 节中基于改进雷达图模型的多目标容量优化配置结果相比,相对重要程度更大的性能指标  $L_{\text{hsp}}$  未得到合适的优化结果。

基于该容量配置方案,图 7 给出了冬季典型日微网系统电力系统层和热力系统层的功率和能量变化情况。由图 7 可知,微网系统基本不存在弃光现象,能量利用率较高,且未出现失电现象;但微网系统出现明显的失热现象,难以保证热负荷的可靠供应。微网系统的功率和能量变化情况与上文的分析一致,因此相较于多目标加权算法,所提的基于改进雷达图模型的多目标容量优化算法具有更好的适用性。

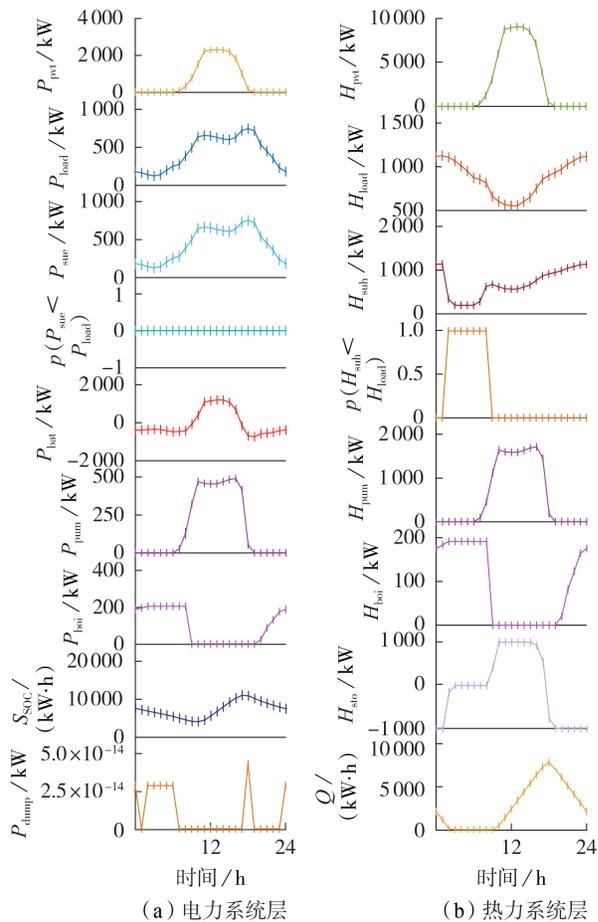


图 7 采用多目标加权算法时微网电力、热力系统层的功率和能量波形

Fig.7 Power and energy waveforms in electricity and heat layer of microgrid with multi-objective weighted algorithm

## 7 结论

本文提出了一种基于改进雷达图模型的热电联供型微网系统多目标优化配置方法。首先,提出含有 PV/T 单元、变流器、储电单元、热泵、电锅炉、储热单元及电、热负荷的微网结构,并选取了 5 个优化目标,用于全面表征热电联供型微网系统的供电可靠性、供热可靠性、经济性和可再生能源利用情况。其次,建立了多目标的改进雷达图模型,并基于扇形面积和周长构造了适应度函数。然后,为保证微网系统的电、热稳定供应,给出了约束条件,从而建立了以最大化适应度函数为目标的优化配置模型,并通过优化执行过程,求解得到综合性能最优的微网系统容量配置结果。最后,根据青海省偏远地区的案例分析,验证了提出的多目标优化配置方法的有效性。

此外,本文考虑了微网孤岛运行模式,优化执行过程中采用了负荷跟踪管理策略,该运行策略逻辑简单,可优先保证负荷的供能需求,但由于存在大量的判断及分离求解的方程,会出现难以保证最优解以及无法保证规划方案位于多目标优化的帕累托前沿的问题,在实际应用中需予以注意。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 周晓倩,余志文,艾芊,等. 含冷热电联供的微网优化调度策略综述[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):26-33.  
ZHOU Xiaoqian, YU Zhiwen, AI Qian, et al. Review of optimal dispatch strategy of microgrid with CCHP system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 26-33.
- [2] 施泉生,丁建勇,刘坤,等. 含电、气、热 3 种储能的微网综合能源系统经济优化运行[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):269-276.  
SHI Quansheng, DING Jianyong, LIU Kun, et al. Economic optimal operation of microgrid integrated energy system with electricity, gas and heat storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 269-276.
- [3] CHEN X, KANG C, O'MALLEY M, et al. Increasing the flexibility of combined heat and power for wind power integration in China: modeling and implications[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4): 1848-1857.
- [4] 夏永洪,吴虹剑,辛建波,等. 考虑风/光/水/储多源互补特性的微网经济运行评价方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(7):63-69.  
XIA Yonghong, WU Hongjian, XIN Jianbo, et al. Evaluation of economic operation for microgrid with complementary DGs and energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 63-69.
- [5] 于婧,孙宏斌,沈欣炜. 考虑储热装置的风电-热电机组联合优化运行策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):139-145.  
YU Jing, SUN Hongbin, SHEN Xinwei. Optimal operating strategy of integrated power system with wind farm, CHP unit and heat storage device[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 139-145.

- [6] 潘扬,石立宝,姚诸香,等. 考虑多风电场出力耦合特性的热电联合优化调度[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):232-238.  
PAN Yang, SHI Libao, YAO Zhuxiang, et al. Optimal scheduling of combined heat and power system considering coupling characteristics of multiple wind farm outputs[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 232-238.
- [7] 戴远航,陈磊,闵勇,等. 风电场与含储热的热电联产联合运行的优化调度[J]. 中国电机工程学报,2017,37(12):3470-3479.  
DAI Yuanhang, CHEN Lei, MIN Yong, et al. Optimal dispatch for joint operation of wind farm and combined heat and power plant with thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3470-3479.
- [8] QIU L, LI Y S. Micro-grid system integrated with GSHP[J]. Advanced Materials Research, 2015(1092 / 1093): 288-291.
- [9] 孙健,黄章锋,谢敏倩. 基于分形换热器的聚光太阳能PV/T一体化系统数值研究[J]. 太阳能学报,2017,38(11):3036-3042.  
SUN Jian, HUANG Zhangfeng, XIE Minqian. Numerical investigation of solar concentrating PV/T system based on fractal heat sink[J]. Acta Energetica Sinica, 2017, 38(11): 3036-3042.
- [10] LI P, LI R, CAO Y, et al. Multi-objective sizing optimization for island microgrids using triangular aggregation model and levy-harmony algorithm[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(8): 3495-3505.
- [11] 李鹏,郑苗苗,陈安伟,等. 基于文化基因算法的交直流混合微网优化运行[J]. 中国电机工程学报,2018,38(11):3226-3234.  
LI Peng, ZHENG Miaomiao, CHEN Anwei, et al. Optimal operation of hybrid AC/DC microgrid based on memetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(11): 3226-3234.
- [12] 王佳颖,史俊伟,文福拴,等. 计及需求响应的光热电站热电联供型微网的优化运行[J]. 电力系统自动化,2019,43(1):176-189.  
WANG Jiaying, SHI Junyi, WEN Fushuan, et al. Optimal operation of CHP microgrid with concentrating solar power plants considering demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 176-189.
- [13] 宋阳阳,王艳松,衣京波. 计及需求侧响应和热/电耦合的微网能源优化规划[J]. 电网技术,2018,42(11):3469-3476.  
SONG Yangyang, WANG Yansong, YI Jingbo. Microgrid energy source optimization planning considering demand side response and thermo-electrical coupling[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3469-3476.
- [14] 魏大钧,孙波,赵峰,等. 小型生物质沼气冷热电联供系统多目标优化设计与运行分析[J]. 电力系统自动化,2015,39(12):7-12.  
WEI Dajun, SUN Bo, ZHAO Feng, et al. Multi-objective optimization design and operation analysis of a small biomass biogas combined cooling heating and power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 7-12.
- [15] EBRAHIMI M, KESHAVARZ A. Sizing the prime mover of a residential micro-Combined Cooling Heating and Power(CCHP) system by multi-criteria sizing method for different climates[J]. Energy, 2013, 54: 291-301.
- [16] 熊焰,吴杰康,王强,等. 风光气储互补发电的冷热电联供优化协调模型及求解方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3616-3625.  
XIONG Yan, WU Jiekang, WANG Qiang, et al. An optimization coordination model and solution for combined cooling, heating and electric power systems with complimentary generation of wind, PV, gas and energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3616-3625.
- [17] 乔鹏程,吴正国,李辉. 基于改进雷达图法的电能质量综合评估方法[J]. 电力自动化设备,2011,31(6):88-92.  
QIAO Pengcheng, WU Zhengguo, LI Hui. Power quality synthetic evaluation based on improved radar chart[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 88-92.
- [18] 李国栋,李庚银,杨晓东,等. 基于雷达图法的电能质量综合评估模型[J]. 电力系统自动化,2010,34(14):70-74.  
LI Guodong, LI Gengyin, YANG Xiaodong, et al. A comprehensive power quality evaluation model based on radar chart method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(14): 70-74.
- [19] 李冠群,孙晓琳,陈金峰,等. 基于光电/光热一体化的太阳能热泵性能分析[J]. 化工学报,2016,67(2):291-297.  
LI Guanqun, SUN Xiaolin, CHEN Jinfeng, et al. Performances of PV/T solar-assisted heat pump system[J]. CIESC Journal, 2016, 67(2): 291-297.
- [20] 徐飞,闵勇,陈磊,等. 包含大容量储热的电-热联合系统[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5063-5069.  
XU Fei, MIN Yong, CHEN Lei, et al. Combined electricity-heat operation system containing large capacity thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5063-5069.
- [21] 杜琳,孙亮,陈厚合. 计及电转气规划的综合能源系统运行多指标评价[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):110-116.  
DU Lin, SUN Liang, CHEN Houhe. Multi-index evaluation of integrated energy system with P2G planning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 110-116.
- [22] 崔鹏程,史俊伟,文福拴,等. 计及综合需求侧响应的能量枢纽优化配置[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):101-109.  
CUI Pengcheng, SHI Junyi, WEN Fushuan, et al. Optimal energy hub configuration considering integrated demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 101-109.
- [23] 欧阳森,石怡理. 改进熵权法及其在电能质量评估中的应用[J]. 电力系统自动化,2013,37(21):156-159.  
OUYANG Sen, SHI Yili. A new improved entropy method and its application in power quality evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 156-159.
- [24] 年珩,孔亮. 环网式直流微网短路故障下断路器与限流器优化配置方法[J]. 中国电机工程学报,2018,38(23):95-106.  
NIAN Heng, KONG Liang. An optimization placement method for circuit breakers and fault current limiters of looped-type DC micro-grids for short circuit faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 95-106.
- [25] 李慧星,曹焜洪,冯国会,等. 严寒地区PV/T-空气源热泵集成供热系统研究[J]. 建筑节能,2015,43(5):52-55.  
LI Huixing, CAO Chihong, FENG Guohui, et al. PV/T-air source heat pump integrated heating system in severe cold region[J]. Building Energy Efficiency, 2015, 43(5): 52-55.

#### 作者简介:



赵建勇

赵建勇(1987—),男,山东潍坊人,工程师,博士研究生,主要研究方向为新能源发电技术及储能控制技术(E-mail: jyzhao@zju.edu.cn);

年珩(1978—),男,安徽合肥人,教授,博士,主要研究方向为可再生能源并网运行、风力发电技术(E-mail: nianheng@zju.edu.cn)。

(编辑 李玮)

## Multi-objective optimization configuration for combined heat and power microgrid system based on improved radar chart model

ZHAO Jianyong<sup>1,2</sup>, NIAN Heng<sup>1,2</sup>, MA Runsheng<sup>3</sup>, SONG Xiaotong<sup>3</sup>,  
SHI Shengchao<sup>3</sup>, FAN Caixiong<sup>3</sup>, PANG Bo<sup>1,2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Electrical Machine Systems, Hangzhou 310027, China;

3. State Grid Qinghai Electric Power Company Electric Power Research Institute, Xining 810008, China)

**Abstract:** In order to solve the size configuration problem of the combined heat and power microgrid system, a multi-objective optimization configuration approach is developed on the basis of improved radar chart model. Firstly, a typical microgrid structure is established, which consists of photovoltaic thermal element, inverter, battery, heat pump, boiler, heat storage and load. Five optimization objectives are selected to comprehensively represent power supply reliability, heat supply reliability, economy and renewable energy usage of microgrid system. Then, a multi-objective improved radar chart model is built, and a fitness function is designed on the basis of the sector area and perimeter. Several constraints are subsequently given to ensure reliable power and heat supply. In this way, an optimal configuration model aiming at maximizing the value of fitness function is built. Through the optimization implementation process, the optimal configuration result is obtained. Finally, numerical results of a realistic case in Qinghai province validate the feasibility of the proposed multi-objective optimization configuration method.

**Key words:** radar chart model; combined heat and power microgrid system; multi-objective optimization configuration; fitness function

(上接第 30 页 continued from page 30)

## Combined load flow of integrated electricity-water system for regional multi-energy service

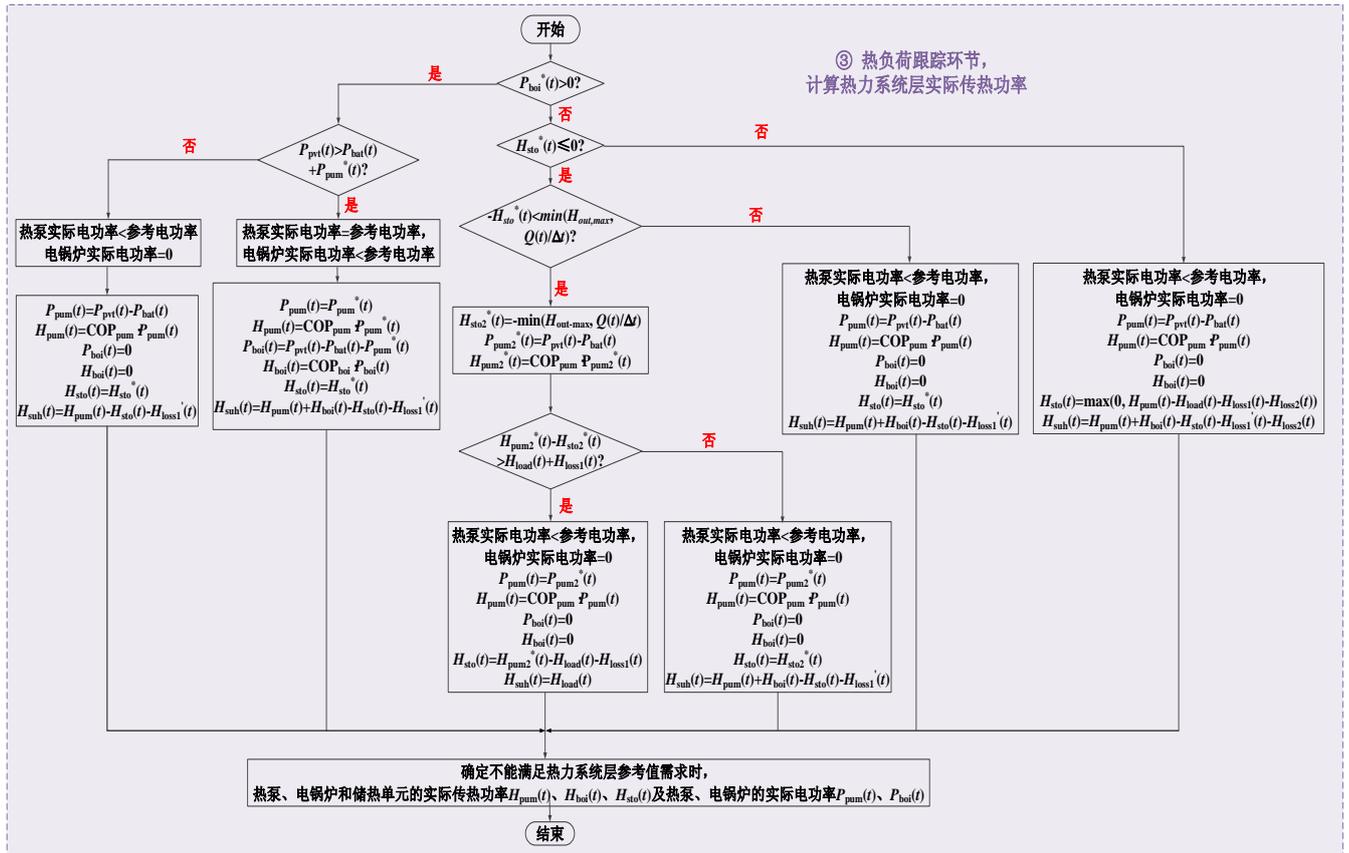
ZHAO Xia, SUN Mingyi, LI Xinyi, HU Xiaoyun

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,  
Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Most existing researches on the load flow analysis of integrated energy system focus on the multi-energy system composed of power, heat and natural gas system. There are only a few researches on the load flow of IEWS (Integrated Electricity-Water System), which, however, suffer from the problems of single coupling mode and poor adaptability. To address these problems, the load flow model and its calculation method for a regional IEWS composed of a power distribution network and a water distribution network are proposed to provide an analysis tool for the regional integrated electricity-water service providers. Firstly, two user-level electricity-water energy hub models are established to describe the electricity-water relationship of integrated energy consumption behaviors of terminal users. On this basis, the approach to calculate the regional integrated electricity-water load flow is proposed. In this model, different couplings between electricity and water (i.e. the couplings through pump station and user-level energy hubs), and the pressure-demand relationship of water loads are taken into account. The proposed method is verified by two regional IEWS test cases that have different scales. The impacts of user-level electricity-water energy hubs and the pressure-demand characteristics of water loads on the load flow distribution are compared and discussed.

**Key words:** integrated energy system; integrated electricity-water system; power distribution network; water distribution network; load flow; electricity-water energy hub; pressure-driven analysis





图A2 热负荷跟踪环节

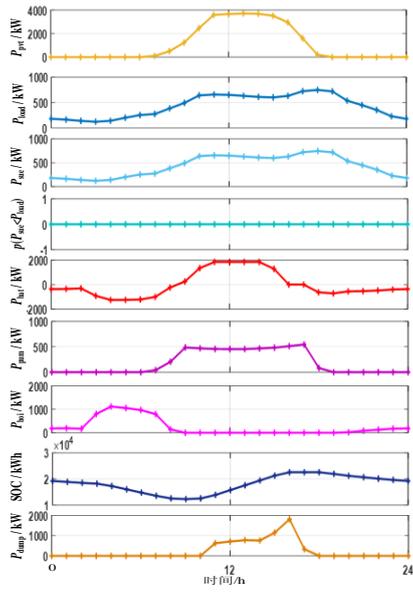
Fig.A2 Thermal load tracking link

表 A1 热电联供型微网系统各组成单元成本

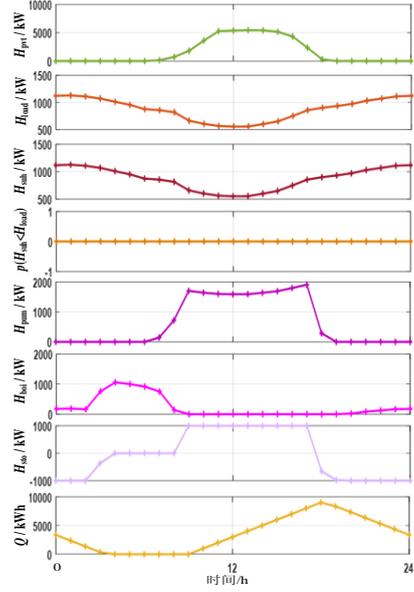
Table A1 Component cost of the combined heat and power microgrid system

单元	参数	数值	单位
PV/T单元	$C_i$	4000	元/kW
	$C_m$	100	元/(a kW)
储电单元 (锂离子电池)	$C_i$	2000	元/组
	$C_m$	60	元/(a 组)
	每组容量	1.28	kW h
变流器单元	$C_i$	300	元/kW
	$C_m$	10	元/(a kW)
储热单元	$C_i$	600	元/(kW h)
	$C_m$	10	元/[a · (kW h)]
热泵	$C_i$	860	元/kW
	$C_m$	25	元/(a kW)
	平均能效比值	3.5	
电锅炉	$C_i$	800	元/kW
	$C_m$	20	元/(a kW)
	平均COP	0.95	

注:  $C_i$ 为初始投资成本;  $C_m$ 为运行维护成本。



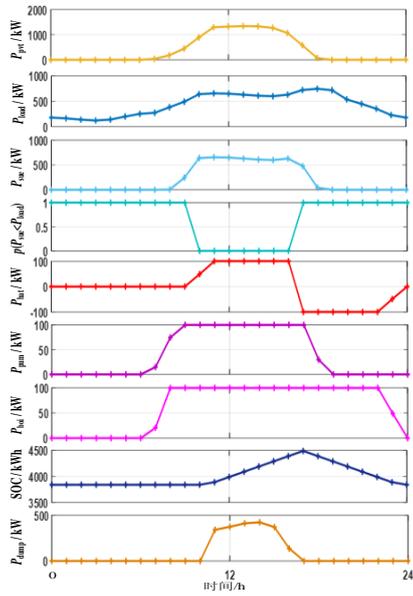
(a)电力系统层



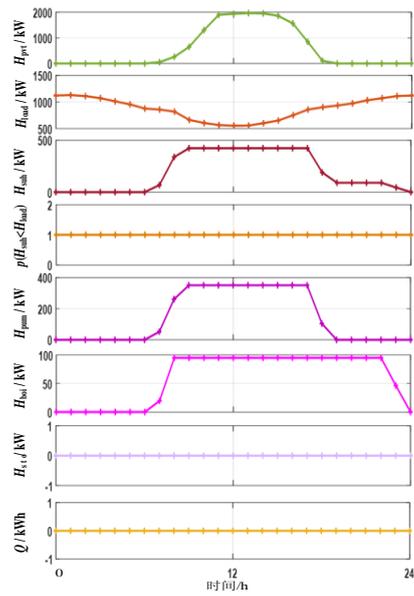
(b)热力系统层

图A3  $L_{hsp}$ 最小化时微网电力/热力系统层的功率和能量波形

Fig.A3 Power and energy waveforms in electricity/heat layer of microgrid with optimization target of minimizing  $L_{hsp}$



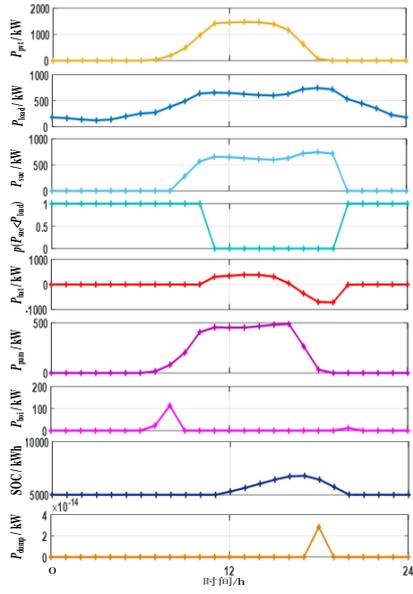
(a)电力系统层



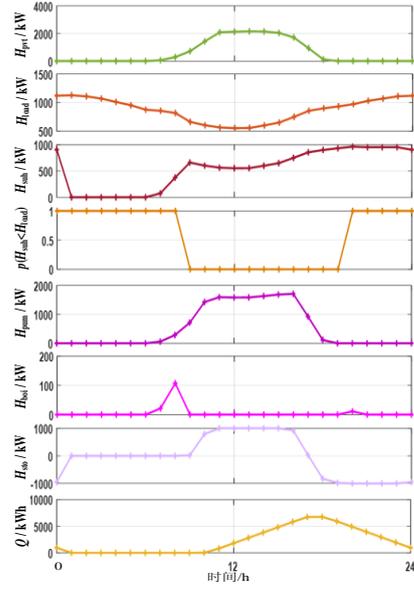
(b)热力系统层

图A4  $C_{as}$ 最小化时微网电力/热力系统层的功率和能量波形

Fig.A4 Power and energy waveforms in electricity/heat layer of microgrid with optimization target of minimizing  $C_{as}$



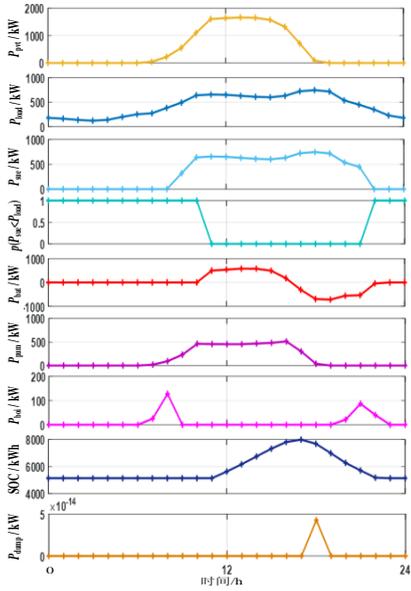
(a)电力系统层



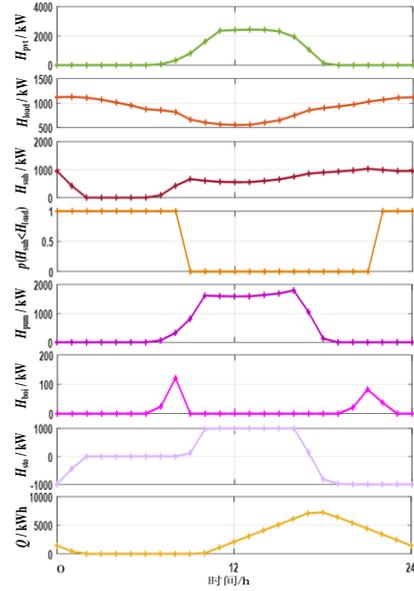
(b)热力系统层

图A5  $L_{reg}$ 最小化时微网电力/热力系统层的功率和能量波形

Fig.A5 Power and energy waveforms in electricity/heat layer of microgrid with optimization target of minimizing  $L_{reg}$



(a)电力系统层



(b)热力系统层

图A6  $R_{ex}$ 最小化时微网电力/热力系统层的功率和能量变化情况

Fig.A6 Power and energy waveforms in electricity/heat layer of microgrid with optimization target of minimizing  $R_{ex}$