

考虑变工况特性的微能源系统优化规划

(一)基本模型和分析

李建林¹, 田立亭^{1,2}, 程 林², 郭剑波¹

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 100192;

2. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 清华大学, 北京市 100084)

摘要:微能源系统是能源互联网发展应用的重要形式之一。微能源系统是一个多输入多输出系统,各类能源转换设备和存储设备构成系统输入和输出的耦合关系。各设备通常具有非线性工作特征,使其运行特性与设计点发生偏移。针对微能源系统输入/输出的非线性关系,考虑储能的接入,建立微能网变工况静态耦合模型和储能状态转移模型,通过输入能源的统一折合,定义系统综合能源消耗,并提出依据微增率安排能源转换设备出力的策略。最后,以一个包含光伏、配电变压器、天然气热电联供、热泵、电池储能、蓄热式电锅炉的系统对所建立模型进行了应用和验证。提出的考虑微能源系统变工况特性的通用模型,是微能源系统优化设计和运行的基础。

关键词:微能源系统; 变工况特性; 能源集线器; 储能; 微增率

0 引言

实现多能源系统的集成与协同是解决可再生能源消纳问题的有效途径^[1]。与单一能源系统相比,综合能源系统中电能、热能等能源以一定耦合形式形成互补关系,共同构成能源供应体系。从地理范畴看,综合能源系统可涵盖一座建筑、一个地区、一个城市乃至一定区域的能源供应和消费系统。文献[2]将综合能源系统划分为三个层次:区域能源系统、能源配送系统和微能源系统。类似于微网,微能源系统(或称为多能源微网)是基于分布式能源生产和供应的一种综合能源系统,也是综合能源系统的基本单元,可看作大型综合能源网络的一个基本节点。实际上,微能源系统包含了多种能源生产、转换和存储设备,涉及各设备的优化组合、配置和协调运行问题。

微能源系统针对用户用能需求特点和本地资源条件,实现分布式能源生产的互补、能源梯级利用和高效运行。目前,关于微能源系统的研究和实践已引起国内外相关工作者的关注。文献[3]从能源输入、再生产和消费环节详细分析了该类系统的能源

产品和能源服务,以及各方利益诉求。文献[4]针对园区级微能源系统,建立含有可再生能源以及冷、热、电多种能源形式的微能网优化运行模型。文献[5-6]提出微能源系统的控制架构层级,其中文献[6]依据电、气、热能源控制的时间尺度,将底层控制层划分为快、中、慢三个尺度,基于静态系统调度指令进行滚动修正控制。文献[7]建立了微能源系统中设备元件的状态模型,并提出微能源系统可靠性的评价指标和评价方法。文献[8]将其划分为正常态、预防态和应急态,考虑经济性目标建立了微能源系统优化运行模型,并评估了微能源系统在响应能源价格信号、提高供能可靠性、提供系统备用服务的价值,指出各服务之间的潜在冲突和协同问题。

微能源系统中多输入多输出特性是其优化规划和运行的基础,如在正常运行模式下,输入能源的价格和能源输入量是系统经济运行考虑的条件,在孤岛运行模式下,则需要考虑输入能源为零的约束,以及输出能源是否满足用能可靠性要求。反映微能源系统输入/输出关系的经典模型为能源集线器(energy hub, EH)模型,由瑞士苏黎世大学的学者提出^[9-10]。文献[11]在 EH 模型中扩展了储能和需求响应模型。文献[12-14]建立了基于 EH 模型的微能网和综合能源系统的静态分析方法和能量调度方法,文献[15-16]建立了 EH 模型的协同控制方法。

在上述工作中,微能源系统的多输入和多输出

收稿日期: 2017-12-18; 修回日期: 2018-06-25。

上网日期: 2018-08-27。

国家重点研发计划资助项目(2017YFB0903300); 国家自然科学基金资助项目(51777197); 国家电网公司科技项目(DG71-18-012)。

关系被一般性地简化为线性耦合关系。实际上,各类能源设备通常具有明显的变工况特性,即设备在不同环境、负荷率下的输出特性有明显的差异^[17]。线性 EH 模型对各设备变工况特性的忽略或简化在一定程度上令系统的能量转换/转移关系发生偏移。

为了更准确地描述微能源系统的输入/输出关系,为微能源系统的优化运行和规划提供基础。本文考虑微能源系统中各能源设备的变工况运行特性,对 EH 模型进行改进,并分别从输入/输出端口建立储能的耦合模型,以适应不同储能设备类型,建立含储能的微能源系统变工况耦合关系通用模型。本文针对一个包含有光伏(PV)、天然气热电联供(CHP)、热泵(HP)、燃气锅炉(GB)、电池储能(BES)、蓄热式电锅炉(EB)的微能源系统进行实例建模,利用所建立模型分析系统在不同运行点下的输入能源消耗。

1 含储能的微能源系统变工况耦合模型

经典的 EH 模型定义了能源输入端口 i 和输出端口 j 功率的耦合关系为:

$$\begin{bmatrix} p_j^a \\ p_j^b \\ p_j^c \\ \vdots \\ p_j^w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{ij}^{aa} & c_{ij}^{ba} & c_{ij}^{ca} & \cdots & c_{ij}^{wa} \\ c_{ij}^{ab} & c_{ij}^{bb} & c_{ij}^{cb} & \cdots & c_{ij}^{wb} \\ c_{ij}^{ac} & c_{ij}^{bc} & c_{ij}^{cc} & \cdots & c_{ij}^{wc} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{ij}^{aw} & c_{ij}^{bw} & c_{ij}^{cw} & \cdots & c_{ij}^{ww} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_i^a \\ p_i^b \\ p_i^c \\ \vdots \\ p_i^w \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,上标 $a, b, c, \dots, w$ 代表能源输入形式,如风、太阳辐射、天然气、电力等,属于集合 ζ ;上标 $\alpha, \beta, \gamma, \dots, \omega$ 代表能源输出形式,如电力、热水、冷水、蒸汽等,属于集合 ξ 。可以看出, EH 模型是微能源系统能源输入/输出稳态关系的一种简化模型,其并不包含传输环节。

EH 模型的数学表达形式,也称为 EH 平衡方程,可以写为:

$$\mathbf{P}_j - \mathbf{C}_{ij} \mathbf{P}_i = \mathbf{0} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{P}_i$ 为输入功率向量; $\mathbf{P}_j$ 为输出功率向量; $\mathbf{C}_{ij}$ 为耦合矩阵,满足 $0 \leq \sum_{a \in \zeta} c_{ij}^{a\beta} \leq 1, \forall \beta \in \xi$,其元素 $c_{ij}^{a\beta}$ 可表达为 $c_{ij}^{a\beta} = v_{ij}^{a\beta} \eta_{ij}^{a\beta}, \forall a \in \zeta, \forall \beta \in \xi$,其中, $v_{ij}^{a\beta}$ 为分配系数^[9],表示输入能源 a 向输出能源 β 转换的比例, $\sum_{\beta \in \xi} v_{ij}^{a\beta} = 1, \forall a \in \zeta, \eta_{ij}^{a\beta}$ 为能源转换设备的效率。

在经典 EH 模型中,认为耦合矩阵中的效率为常数,用于描述能源输入/输出之间的线性关系。而对于多数设备,其能源转换效率随输出功率的变化而变化,通常体现为非线性特性。设系统包含 n 个

能源转换设备,为考虑设备在出力变化时的工作特性,引入各能源设备的输出功率向量: $\mathbf{P}_{jd} = [p_{j1}, p_{j2}, \dots, p_{jn}]^T$ 。其中, $\mathbf{P}_{jd}$ 为系统的中间变量,为获得系统输入/输出关系,需要分别建立 $\mathbf{P}_{jd}$ 与能源输入、输出向量的关联矩阵。

对于输入向量 $\mathbf{P}_i$,有

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{U}_{id} \mathbf{P}_{jd} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{U}_{id}$ 为各设备输出功率与输入能源的转换矩阵,即

$$\mathbf{U}_{id} = \begin{bmatrix} u_{i1}^a & u_{i2}^a & \cdots & u_{in}^a \\ u_{i1}^b & u_{i2}^b & \cdots & u_{in}^b \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{i1}^w & u_{i2}^w & \cdots & u_{in}^w \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $u_{ik}^a = (\eta_{ik}^a)^{-1}$,为能源转换系数,为设备 k 能源转换效率 η_{ik}^a 的倒数, $k = 1, 2, \dots, n; \forall a \in \zeta$;在变工况工作下, u_{ik}^a 为设备 k 消耗输入能源 a 与输出功率 p_{jk} 的函数。

对于输出向量 $\mathbf{P}_j$,有

$$\mathbf{P}_j = \mathbf{B}_{jd} \mathbf{P}_{jd} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{B}_{jd}$ 为同质能源输出归属矩阵,表示各类型设备输出能源与系统输出能源的归属关系,当设备输出能源与系统输出能源类型、品质相同时,对应元素为 1,反之为 0, $\mathbf{B}_{jd}$ 可表示为:

$$\mathbf{B}_{jd} = \begin{bmatrix} b_{j1}^a & b_{j2}^a & \cdots & b_{jn}^a \\ b_{j1}^b & b_{j2}^b & \cdots & b_{jn}^b \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{j1}^w & b_{j2}^w & \cdots & b_{jn}^w \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{B}_{jd}$ 中元素 $b_{jk}^a \in [0, 1], \forall a \in \xi; k = 1, 2, \dots, n; \sum_{a \in \xi} b_{jk}^a = 1$ 。

对于储能设备,由于其只用于系统能源生产、利用的平衡,不直接参与能源输入/输出,其能量接口位于 EH 模型的内部。在已有工作中,储能设备的储能和释能通常被建立为通过同一转换装置^[11-12],实际上在微能源系统中储能的储能和释能可能涉及不同能源类型以及能源的转换^[17-18],因此,本文将储能装置的储能和释能功率端口进行独立建模,如图 1 所示。

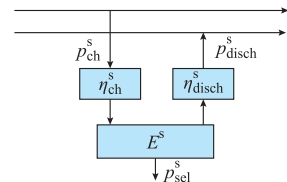


图 1 储能设备储能/释能独立模型
Fig.1 Independent charging/discharging model of energy storage devices

图 1 中,储能设备与系统的接口功率用储能功率 p_{ch}^s 和释能功率 p_{disch}^s 表示; p_{self}^s 为储能的自损耗功率; E^s 为储能的能量状态,即储能设备可释放的能量。

储能的转换和存储效率通常与储能的能量状态有关,此处建立离散的储能阶段能量状态转移方程为:

$$E_{t+1}^s = E_t^s + p_{ch,t}^s \eta_{ch,t}^s \Delta t - p_{disch,t}^s (\eta_{disch,t}^s)^{-1} \Delta t - p_{self}^s \Delta t \quad (7)$$

式中: E_t^s 为储能设备在 t 时段的能量状态; Δt 为离散的时段长度; $\eta_{ch,t}^s$ 为 t 时段的储能效率; $\eta_{disch,t}^s$ 为 t 时段的释能效率,可表述为当前 t 时段的储能设备能量状态和储/释能功率函数。

在独立储/释能模型的基础上,对式(3)和式(5)进行扩展,得到新的平衡方程为:

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{U}_{id} \mathbf{P}_{jd} + \mathbf{S}_i \mathbf{P}_s \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_j = \mathbf{B}_{jd} \mathbf{P}_{jd} + \mathbf{S}_j \mathbf{P}_s \quad (9)$$

式中: $\mathbf{P}_s = [p_{1,ch}^s, p_{1,disch}^s, \dots, p_{m,ch}^s, p_{m,disch}^s]^T$ 为储能设备 1 到 m 的充放电功率向量。

$\mathbf{S}_i$ 和 $\mathbf{S}_j$ 分别为储能设备与系统输入/输出端口的归属矩阵,即

$$\mathbf{S}_i = \begin{bmatrix} s_{i1,c}^a & s_{i1,d}^a & \cdots & s_{im,d}^a \\ s_{i1,c}^b & s_{i1,d}^b & \cdots & s_{im,d}^b \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_{i1,c}^w & s_{i1,d}^w & \cdots & s_{im,d}^w \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{S}_j = \begin{bmatrix} s_{j1,c}^a & s_{j1,d}^a & \cdots & s_{jm,d}^a \\ s_{j1,c}^b & s_{j1,d}^b & \cdots & s_{jm,d}^b \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_{j1,c}^w & s_{j1,d}^w & \cdots & s_{jm,d}^w \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: $s_{ik,c}^a$ ($s_{jk,c}^a$) 和 $s_{ik,d}^a$ ($s_{jk,d}^a$) 分别为储能充放电端口在系统输入端 i (输出端 j) 的归属系数; $s_{ik,c}^a, s_{jk,c}^a \in [0, 1]; s_{ik,d}^a, s_{jk,d}^a \in [0, -1]; \forall a \in \xi; k = 1, 2, \dots, m$ 。

显然,对于储能和释能通过同一端口的储能设备,不能同时进行储能和释能,约束为:

$$s_{ik,c}^a s_{ik,d}^a p_{ik,c}^s p_{ik,d}^s = 0 \quad \forall a \in \xi \quad (12)$$

$$s_{jk,c}^a s_{jk,d}^a p_{jk,c}^s p_{jk,d}^s = 0 \quad \forall a \in \xi \quad (13)$$

式中: $p_{ik,c}^s$ ($p_{jk,c}^s$) 和 $p_{ik,d}^s$ ($p_{jk,d}^s$) 分别为释能充放电端口在系统输入端 i (输出端 j) 的归属系数。

由式(6)至式(13)得到了含储能微能源系统的变工况输入/输出通用耦合模型,其中式(8)、式(9)为改进 EH 模型的平衡方程;式(7)、式(12)、式(13)为储能引入的约束条件,其中式(12)、式(13)为非凸约束。

2 系统等效综合能源消耗及微增率

微能源系统的输入包含多种能源形式,为了对各种输入进行统一衡量,本文定义系统的等效综合能源消耗(EMEC)为:

$$E_{EMEC} = \sum_{a \in \xi} \mu^a p_i^a \Delta t \quad (14)$$

式中: μ^a 可为输入能源 a 对应的价格、系数^[19]等,其将各输入能源形式折算到可以统一衡量的形式。

将式(8)代入式(14)可得到某个时段下系统总 EMEC:

$$E_{EMEC} = \boldsymbol{\mu}^T (\mathbf{U}_{id,t} \mathbf{P}_{jd,t} + \mathbf{S}_i \mathbf{P}_{s,t}) \Delta t \quad (15)$$

式中: $\boldsymbol{\mu} = [\mu^a, \mu^b, \dots, \mu^w]^T$, 为输入能源折算系数向量;下标 t 表示 t 时段对应的变量。

定义设备的等效综合能源变化率(以下简称为微增率)为:

$$\frac{\partial E_{EMEC}}{\partial p_{jk,t}} = \sum_{a \in \xi} \left(\mu^a \eta_{ik,t}^a + \mu^a p_{jk,t} \frac{d\mu_{ik,t}^a}{dp_{jk,t}} \right) \quad (16)$$

容易证明,对于某一时段的用能需求 $\mathbf{P}_{j,t}$,在各能源转换设备的运行范围内,系统的等效综合能源消耗最低时,具有相同输出归属能源转换设备的微增率相同,若 $b_{jk}^a = b_{jk'}^a = 1, \forall a \in \xi$,则有

$$\frac{\partial E_{EMEC}}{\partial p_{jk,t}} = \frac{\partial E_{EMEC}}{\partial p_{jk',t}} \quad k \neq k' \quad (17)$$

式中: $p_{jk,t}$ 和 $p_{jk',t}$ 为 t 时段系统的中间变量元素。

类似电力系统机组负荷分配问题,也可以按照等微增率准则对设备输出功率进行分配。为使系统尽量减少 EMEC,可按照如下原则进行各设备出力的调整。

- 1) 当系统某类品质能源输出功率增加时,应尽量让微增率小的设备带满负荷。
- 2) 当系统某类品质能源负荷降低时,应让微增率大的设备减少负荷。

在上述原则中,认为 $\mathbf{P}_{jd}$ 中各元素是独立的。实际上,存在多能源耦合输出设备,如 CHP 机组,该类设备引入多种输出功率之间的耦合约束关系,使得微增率原则不再适用。此时,需要以式(15)为目标函数,按照各能源转换设备进行优化经济调度。

直观上,储/释能过程中的损耗增加了系统的能源消耗,但储能的存在使系统的能源需求得到转移,若通过储能的储/释能改变系统中其他设备的工作点,使其他设备高效率工作,则可从整体上降低系统的能源消耗。在考虑储能时,需要在储能容量约束下,采取一定的储/释能策略,对系统内各设备的出力进行协同管理。由于储能引入了式(12)、式(13)的非凸约束,使得系统优化经济调度问题变得难以求解。可以看出,式(12)、式(13)仅在储/释能为同

一端口时才存在,此时,在以式(15)为目标函数,以式(9)为约束时,利用 KKT(Karush-Kuhn-Tucker)条件可以证明,该非凸约束可以被松弛^[20]。

3 含储能微能源系统变工况特性建模

本文考虑一个含有 PV 发电、配电变压器 (TR)、CHP、HP、电化学储能 (BES)、GB、EB 的微能源系统如图 2 所示。分别用 pv, tr, chp, hp, bes, gb, eb 作下标表示上述设备对应的量。该系统为本地用户提供电、热能源服务,系统的输入能源包括太阳辐射、电网供电和天然气输入,输出为热和电力;分别用 sr, el, gas, h, e 作为上标表示上述输入/输出对应的量。

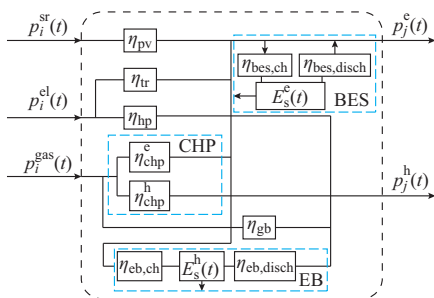


图 2 微能源系统案例组成结构

Fig.2 Configuration of studied micro-energy system

根据式(8)、式(9)建立该系统的平衡方程,依据系统结构,方程中的输入、输出向量、能源转换设备功率输出向量、储能的储/释能功率向量定义为:

$$\begin{cases} \mathbf{P}_i = [p_i^{sr}(t) & p_i^{el}(t) & p_i^{gas}(t)]^T \\ \mathbf{P}_j = [p_j^e(t) & p_j^h(t)]^T \\ \mathbf{P}_{jD} = [p_{j,pv}^e & p_{j,tr}^e & p_{j,chp}^e & p_{j,chp}^h & p_{j,gb}^h & p_{j,gb}^h]^T \\ \mathbf{P}_s = [p_{bes,ch}^{se} & p_{bes,disch}^{se} & p_{eb,ch}^{sh} & p_{eb,disch}^{sh}]^T \end{cases} \quad (18)$$

式中: $\mathbf{P}_i$ 中元素分别为 PV 系统的太阳辐照功率、从电网购得的电功率、输入天然气的折合功率; $\mathbf{P}_j$ 中元素分别为系统的输出电功率和热功率; $\mathbf{P}_{jD}$ 中元素分别为 PV 发电功率、TR 输出功率、CHP 输出电功率、CHP 输出热功率、HP 输出热功率、GB 输出热功率; $\mathbf{P}_s$ 元素分别为 BES 的充电功率、BES 的放电功率、EB 的耗电 (储热) 功率、EB 的释热功率。对应的归属矩阵 $\mathbf{B}_{jd}$, $\mathbf{S}_i$, $\mathbf{S}_j$ 此处不赘述。为获得 $\mathbf{U}_{id}$ 及储能的状态转移方程,本文将对各类设备的变工况特性建模。

3.1 PV 变工况特性模型

PV 发电的输入能源为日照辐射,具有不确定性, PV 逆变器通常采用最大功率点追踪 (MPPT) 进行 PV 组件侧的直流电压控制^[21]。

本文用五次多项式进行拟合 PV 逆变器在不同直流侧功率下的效率,建立逆变器效率的经验模型^[19],可表达为:

$$\eta_{pv,inv} = \sum_{n=0}^5 a_n^{pv,inv} (p_{j,pv}^e)^n \quad (19)$$

式中: $a_n^{pv,inv}$ 为拟合系数。

由 PV 组件的简化 U-I 特性^[22]可得到在任意辐照强度和温度下的最大功率点为:

$$I_{dm} = I_m \frac{S}{S_{ref}} (1 + a_1^{pv} \Delta T) \quad (20)$$

$$V_{dm} = V_m \ln[1 + a_2^{pv} (S - S_{ref})] (1 - a_3^{pv} \Delta T) \quad (21)$$

式中: V_m 和 I_m 分别为标准测试环境下最大功率点的电压和电流; S 为 PV 组件的实际日照辐射强度; S_{ref} 为标准测试辐照强度; ΔT 为实际环境温度和标准测试环境温度的差值; a_1^{pv} , a_2^{pv} , a_3^{pv} 为已知系数,可由制造商测试数据获得。

在微能源系统中,重点关注可再生能源发电的利用情况,因此本文将 PV 逆变器的出力与直流侧的最大功率之比定义为 PV 发电的利用效率 (须注意此处并非光电转换效率),即

$$\eta_{pv} = \frac{p_{j,pv}^e}{V_{dm} I_{dm}} \quad (22)$$

将直流侧的最大功率 $V_{dm} I_{dm}$ 视为系统输入能源,可得到 PV 发电的变工况能源转换系数为:

$$u_{i,pv}^{sr} = \frac{V_{dm} I_{dm}}{p_{j,pv}^e} \quad (23)$$

其约束为:

$$p_{j,pv}^e \eta_{pv,inv} \leq V_{dm} I_{dm} \quad (24)$$

式中: $\eta_{pv,inv}$ 为逆变器在输出功率 $p_{j,pv}^e$ 下的效率。

3.2 CHP 变工况特性模型

本文研究的 CHP 系统由燃气内燃机和烟气吸收型溴化锂冷热水机组组成。CHP 系统的发电功率和供热功率存在关联关系,溴化锂机组吸收内燃机产生烟气的余热,为用户提供热 (冷) 量。天然气内燃机的发电效率与发电功率呈非线性关系,可用多项式拟合燃气内燃机发电效率^[23],即

$$\eta_{chp}^e = \sum_{n=0}^5 a_n^{chp,e} (p_{j,chp}^e)^n \quad (25)$$

式中: $a_n^{chp,e}$ 为拟合系数。

溴化锂机组效率取决于天然气内燃机的排烟温度和烟气流量。烟气温度、流量为热电联供系统的中间产物,不出现在 EH 模型中,由发电功率与排烟温度、流量的关系可以获得联供系统的制热功率,可表达为^[24]:

$$p_{j,\text{chp}}^{\text{h}} = a_0^{\text{chp,h}} + a_1^{\text{chp,h}} t_g + (a_2^{\text{chp,h}} + a_3^{\text{chp,h}} t_g) m_g + (a_4^{\text{chp,h}} + a_5^{\text{chp,h}} t_g) m_g^2 \quad (26)$$

式中: t_g 为排烟温度; m_g 为烟气流量; $a_1^{\text{chp,h}}$, $a_2^{\text{chp,h}}$, $\dots$, $a_5^{\text{chp,h}}$ 为拟合系数。

排烟温度与发电功率的关系可用三次多项式拟合为:

$$t_g = \sum_{n=0}^3 a_n^{\text{chp,t}} (P_{j,\text{chp}}^{\text{e}})^n \quad (27)$$

烟气流量可用二次多项式拟合为:

$$m_g = \sum_{n=0}^2 a_n^{\text{chp,m}} (P_{j,\text{chp}}^{\text{e}})^n \quad (28)$$

式中: $a_n^{\text{chp,t}}$ 和 $a_n^{\text{chp,m}}$ 为拟合系数。

将式(27)、式(28)代入式(26)可得到 CHP 系统制热功率 $p_{j,\text{chp}}^{\text{h}}$ 对发电功率的解析表达式,即制热功率与发电功率的非线性耦合关系。同时,在低负荷运行时燃气内燃机排烟温度升高、流量降低,燃气内燃机有最低功率约束。

由于 CHP 系统的热功率为发电附加产物,本文考虑 CHP 系统的变工况能源转换系数为输出功率的函数,即

$$u_{i,\text{chp}}^{\text{gas}} = \frac{1}{\eta_{\text{chp}}^{\text{e}}} \quad (29)$$

3.3 HP 变工况特性模型

HP 的制热效率通常用性能系数(COP)描述,负载率、冷热源侧的温度均是影响 HP 的 COP 的主要因素,同样以经验模型建立 HP 的变工况特性模型,即

$$C_{\text{COP, hp}} = (a_0^{\text{hp,t}} + a_1^{\text{hp,t}} T_{\text{ev}} + a_2^{\text{hp,t}} T_{\text{cd}}) \cdot [a_0^{\text{hp,plr}} + a_1^{\text{hp,plr}} p_{j,\text{ph}}^{\text{h}} + a_2^{\text{hp,plr}} (p_{j,\text{ph}}^{\text{h}})^2] \quad (30)$$

式中: T_{ev} 为蒸发器进出口平均水温; T_{cd} 为冷凝器进出口平均水温; $a_0^{\text{hp,t}}$, $a_1^{\text{hp,t}}$, $a_2^{\text{hp,t}}$, $a_0^{\text{hp,plr}}$, $a_1^{\text{hp,plr}}$, $a_2^{\text{hp,plr}}$ 为拟合系数。

HP 的变工况能源转换系数为:

$$u_{i,\text{hp}}^{\text{el}} = \frac{1}{C_{\text{COP, hp}}} \quad (31)$$

本文考虑 HP 机型为地源 HP^[25],地源 HP 的 T_{ev} 和 T_{cd} 受到季节气候、环境温度的影响,简便起见,本文不对温度变化进行建模,设定为已知量。

3.4 GB 变工况特性模型

GB 的热损失包括燃料排烟热损失、不完全燃烧热损失、散热损失等,在低负荷运行下,GB 的效率降低。GB 在部分负荷下的效率可以用文献[26]提出的模型,利用二次多项式进行拟合,即

$$\eta_{\text{gb}} = a_0^{\text{gb}} + a_1^{\text{gb}} p_{j,\text{gb}}^{\text{h}} + a_2^{\text{gb}} (p_{j,\text{gb}}^{\text{h}})^2 \quad (32)$$

式中: a_0^{gb} , a_1^{gb} , a_2^{gb} 为拟合系数。

GB 的变工况能源转换系数为:

$$u_{i,\text{gb}}^{\text{gas}} = \frac{1}{\eta_{\text{gb}}} \quad (33)$$

为了保障 GB 的稳定燃烧, $p_{j,\text{gb}}^{\text{h}}$ 也有最低功率限制。

3.5 BES 变工况运行特性

BES 装置包括变流器和电池组,须分别考虑二者的变工况特性。

电池组在充电、放电过程中的效率可以分别表达为:

$$\eta_{\text{bat,c}} = \frac{V_{\text{OC}} I_{\text{ch}}}{(V_{\text{OC}} + R_0 I_{\text{ch}}) I_{\text{ch}}} \quad (34)$$

$$\eta_{\text{bat,d}} = \frac{(V_{\text{OC}} - R_0 I_{\text{disch}}) I_{\text{disch}}}{V_{\text{OC}} I_{\text{disch}}} \quad (35)$$

式中: V_{OC} 为电池组的总开路电压; R_0 为电池组的总内阻; I_{ch} 为充电电流; I_{disch} 为放电电流。

一般情况下, V_{OC} 为可表达为电池组荷电状态(SOC)的函数,本文用三次多项式拟合 $V_{\text{OC}}-S_{\text{SOC}}$ 变化关系^[27]为:

$$V_{\text{OC}} = \sum_{n=0}^3 a_n^{\text{bes}} (S_{\text{SOC}})^n \quad (36)$$

式中: a_n^{bes} 为拟合系数。

设 $E_{\text{bes}}^{\text{se}}$ 为 BES 的能量状态, $E_{\text{besN}}^{\text{se}}$ 为额定储能容量,则有 $S_{\text{SOC}} = E_{\text{bes}}^{\text{se}} / E_{\text{besN}}^{\text{se}}$ 。

实际上,根据电化学反应机理,电池的内阻并非常数,电池内阻与充放电电流、电池 SOC、温度均有复杂关联,由于电池内阻变化范围较小,上述效率模型忽略了内阻的变化。

变流器的损耗来源于开关器件、隔离变压器、滤波电感、电容等部件的损耗。本文将变流器效率建立为直流侧功率函数,用五次多项式进行拟合,在充放电状态下可分别表达为:

$$\eta_{\text{pcs,c}} = \sum_{n=0}^5 a_n^{\text{pcs,c}} (V_{\text{OC}} I_{\text{ch}} + R_0 I_{\text{ch}}^2)^n \quad (37)$$

$$\eta_{\text{pcs,d}} = \sum_{n=0}^5 a_n^{\text{pcs,d}} (V_{\text{OC}} I_{\text{disch}} - R_0 I_{\text{disch}}^2)^n \quad (38)$$

式中: $a_n^{\text{pcs,c}}$ 和 $a_n^{\text{pcs,d}}$ 为拟合系数。

可得, BES 系统的充放电效率分别为:

$$\eta_{\text{bes,ch}} = \eta_{\text{bat,c}} \eta_{\text{pcs,c}} \quad (39)$$

$$\eta_{\text{bes,disch}} = \eta_{\text{bat,d}} \eta_{\text{pcs,d}} \quad (40)$$

进而得到 BES 系统的充放电功率为:

$$P_{\text{bes,disch}}^{\text{se}} = (V_{\text{OC}} I_{\text{ch}} - R_0 I_{\text{ch}}^2) \eta_{\text{pcs,c}} \quad (41)$$

$$P_{\text{bes,ch}}^{\text{se}} = \frac{1}{\eta_{\text{pcs,c}}} (V_{\text{OC}} I_{\text{ch}} + R_0 I_{\text{ch}}^2) \quad (42)$$

将式(39)至式(41)代入式(7)可获得 BES 的状态转移方程。

通常情况下,为保障电池的使用寿命, BES 状

态有一定范围约束。另外,BES的自损耗较低,如锂离子电池的月自放电率通常在10%以内,本文研究时间尺度下可忽略电池自放电的影响。

3.6 EB变工况蓄热特性

此处考虑EB以热水为蓄热介质,EB的释热功率可表述为^[28]:

$$p_{eb,disch}^{sh} = m_{eb} C_p (T_{in} - T_{out}) \quad (43)$$

式中: m_{eb} 为输出热水流量; C_p 为水的比热容; T_{in} 和 T_{out} 分别为进水温度和出水温度。

蓄热水罐向周边环境散热,其损耗可描述为:

$$p_{eb,sel}^{sh} = A_{eb} \alpha_{eb} (T_{eb}^{sh} - T_{amb}) \quad (44)$$

式中: A_{eb} 为蓄热水罐的表面积; α_{eb} 为热传导系数; T_{eb}^{sh} 为存储热水的温度; T_{amb} 为环境温度。

蓄热水温度随储热和释热功率的变化满足:

$$C \frac{dT_{eb}^{sh}}{dt} = -p_{eb,sel}^{sh} - p_{eb,disch}^{sh} + p_{eb,ch}^{sel} \eta_{eb} \quad (45)$$

式中: C 为热储量; η_{eb} 为电锅炉的制热效率。

此处采用二次多项式进行拟合为:

$$\eta_{eb} = a_0^{eb} + a_1^{eb} p_{eb,ch}^{sel} + a_2^{eb} (p_{eb,ch}^{sel})^2 \quad (46)$$

式中: a_0^{eb} , a_1^{eb} , a_2^{eb} 为拟合系数。

按照第2节的定义,EB的储热状态可表示为:

$$E_{eb}^{sh} = C(T_{eb}^{sh} - T_{ebm}^{sh}) \quad (47)$$

式中: T_{ebm}^{sh} 为EB连续运行的最低储热温度。

将式(43)和式(47)代入式(45),并离散化,可得EB的状态转移方程,此处不赘述。

4 算例分析

考虑上述微能源系统的组成,根据上节中各设备的工作特性模型,可得到各设备在变化负载率下的转换效率曲线,如图3所示,其中HP的工作效率是在额定冷热源侧温度下给出的。可见,低于额定出力时,CHP,HP,GB设备的实际效率明显低于额定效率,使得系统输入/输出转换关系呈现非线性特征。

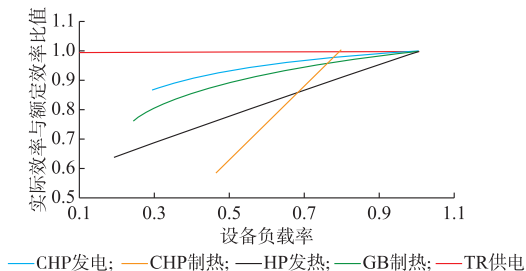


图3 各能源转换设备变工况工作效率

Fig.3 Efficiency of multiple energy conversion devices under off-design operation points

此处,以折合一次能源热值对系统的等效综合

能源消耗进行评估。对于输入光辐照,折算系数 μ^{sr} 取为0,输入电力折算系数 μ^{el} 取为1/0.35^[29],忽略天然气传输损耗,将输入天然气折算系数 μ^{gas} 取为1。为对比各能源设备的EMEC,假设各设备额定功率均为1.0(标么值),计算系统中各设备在不同负载率下的EMEC,如图4所示。可知,图4中各曲线切线的斜率即各设备在相应工作点下的微增率。

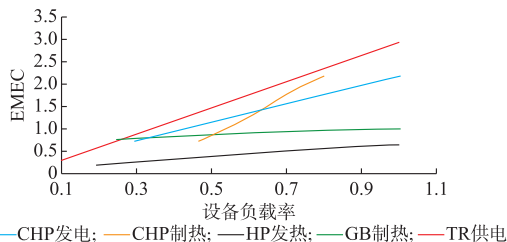


图4 各能源转换设备EMEC曲线

Fig.4 EMEC curve of multiple energy conversion devices

可以看出,对于系统热输出,HP的EMEC低于GB和CHP,在高负载率下,GB低于CHP;对于系统电输出,在高负载率下,CHP的EMEC低于变压器配电。

微能源系统将作为一个整体进行能量管理,本文将针对系统的静态优化调度问题,对所建立模型进行验证。算例中各设备的装机容量见附录A表A1。实际中,各设备的组合配置受到能源转换效率的影响,更与设备的安装条件、成本、能源价格等密切相关,关于系统的优化配置将在后续工作中给出。需要指出,为了对系统进行统一评估,本文以系统最大电力负荷功率为参考值,各设备装机容量、输出功率均以此为基准进行标么化处理。下述计算如无说明,均为标么值。

微能源系统的静态优化调度是根据某一时段的多能源负荷需求和可再生能源预测出力,计算各单元的最优出力值。考虑系统电、热负荷和可再生能源的变化,给定系统的几个变工况运行点以利用所建立模型观察系统的综合能源消耗变化。以式(15)为优化目标,对各设备出力进行优化决策,本文采用内点法对非线性优化问题进行求解,在各运行点下,设备的出力和微增率以及系统的边际输入能源消耗见表1。其中, λ^e 为系统输出电能的边际能源消耗, λ^h 为系统输出热能的边际能源消耗。首先不考虑储能的作用。

A点:该运行点下,系统的电负荷为0.88,热负荷为0.66;PV最大输出功率为0.12;此时,TR负载率为21.7%,输出功率为0.26;CHP的负载率为100%,输出电功率为0.50,热功率为0.398;HP负载率为100%,输出电功率为0.20;GB负载率为31%,

输出功率为 0.062。

B 点:系统电负荷降低为 0.54,热负荷增加为 0.78;此时太阳辐照功率升高,PV 最大输出功率为 0.15;此时,为满足热负荷需求,CHP 输出电功率 0.467,输出热功率 0.380,HP 和 GB 均满负荷运行;

表 1 不同运行点下各能源转换设备的出力 and 微增率
Table 1 Power output and incremental rate of energy conversion devices under different operation points

运行点	出力						微增率						λ^e	λ^h
	PV	TR	CHP 供电	CHP 制热	HP	GB	PV	TR	CHP 供电	CHP 制热	HP	GB		
A	0.120	0.260	0.500	0.398	0.200	0.062	0	2.938	2.393	4.223	0.307	1.179	2.938	1.184
B	0.073	0	0.467	0.380	0.200	0.200	0	2.939	1.993	3.852	0.307	1.043	0	3.850
C	0.180	0	0.460	0.376	0.093	0.050	0	2.939	1.954	3.856	0.540	1.190	1.654	0.557
D	0.160	0	0.308	0.341	0.189	0.050	0	2.939	1.976	3.876	0.323	1.191	1.853	0.331
E	0.060	0.210	0.500	0.398	0.200	0.052	0	2.938	2.393	4.226	0.307	1.189	2.938	1.193

C 点:系统电负荷升高至 0.64,热负荷降低为 0.52;太阳辐照度增加,PV 最大功率为 0.18;TR 功率为 0,CHP 电功率为 0.46,相应 CHP 热功率为 0.376,HP 功率降至 0.093,GB 按最低运行功率出力。

D 点:系统的电负荷降低为 0.54,热负荷升高为 0.58,辐照度保持,PV 最大出力为 0.16;继续降低 CHP 输出功率至 0.308,热功率降低至 0.341;提升 HP 出力至 0.189。

E 点:系统的电负荷升高为 0.77,热负荷升高至 0.65;太阳辐照度降低,PV 最大出力为 0.06;CHP 电功至满功率 0.5,热功率至 0.398;HP 满负荷运行;GB 输出功率提升至 0.052。

可以看出,在 A 点和 E 点,系统供电边际能源消耗均等于 TR 的微增率,同时,由于 CHP 供电的微增率低于 TR,系统在 TR 有输出功率时,CHP 总是满负荷运行。而在 C 点和 D 点时,由于系统电负荷较低,PV 出力较大,TR 无输出,系统输出电能和热能的边际能源消耗均有明显的下降。虽然按照微增率的定义 CHP 制热微增率较大,实际上大多数情况下为 CHP 发电的附加产物,不引起系统输入能源消耗,CHP 将按照其运行点对应的最大能力提供热能。

表 2 为储能工作时,系统各设备的功率输出和系统边际能源消耗。设系统中 BES 可维持额定功率下 $2\Delta t$ 时间的放电;EB 可在额定释热功率下维持 $4\Delta t$ 的时间。令 $\Delta t=1\text{ h}$,则 BES 的额定储能容量 $E_{\text{besN}}^{\text{se}}=0.20$,EB 的额定储能容量 $E_{\text{ebN}}^{\text{sh}}=0.40$ 。初始点 A 不变,设定系统新的运行点 B',C',D',E' 。初始点 BES 的 SOC 为 75%,EB 的剩余蓄热量为额定状态的 80%。

表 2 考虑储能时的系统运行点
Table 2 System operation points considering energy storage devices

运行点	出力								微增率								λ^e	λ^h
	BES (储能/ 释能)	EB (储能/ 释能)	PV	TR	CHP 供电	CHP 制热	HP	GB	BES (储能/ 释能)	EB (储能/ 释能)	PV	TR	CHP 供电	CHP 制热	HP	GB		
B'	0.05/ 0	0.024/ 0.020	0.150	0	0.464	0.378	0.200	0.182	—	—	0	2.939	1.974	3.850	0.307	1.061	1.409	1.066
C'	0.04/ 0	0.020/ 0	0.180	0.020	0.500	0.398	0.072	0.050	—	—	0	2.939	2.393	4.223	0.617	1.191	2.939	0.638
D'	0.03/ 0	0.020/ 0	0.160	0	0.430	0.362	0.168	0.050	—	—	0	2.939	1.895	4.091	0.359	1.191	1.729	0.368
E'	0/ 0.10	0/ 0.020	0.060	0.110	0.500	0.397	0.182	0.050	—	—	0	2.939	2.393	4.223	0.334	1.191	2.939	0.342

注：表中“—”表示无此数据。

由于 B 点下系统输出电能边际能源消耗为 0, 令 BES 和 EB 储能, 由于此时系统输出热能边际能源消耗较大, 令 EB 同时释能; 由于在 C 点和 D 点时, 系统边际能源消耗较低, 令 BES 和 EB 在这两个运行点储能, 令其在边际能源消耗较高的 E 点释能, 同时使 BES 和 EB 在 E 点末期回复初始状态。

B' 点: BES 以 0.050 的功率充电, EB 以 0.024 的电功率储热, 同时以 0.020 的热功率释热, 此时 PV 按照最大功率输出, CHP 电功率由 0.467 降低至 0.464。

C' 点: BES 以 0.04 的功率充电; EB 以 0.02 的电功率蓄热, CHP 满功率输出。

D' 点: BES 以 0.03 的功率充电; EB 以 0.02 的电功率蓄热; 为满足 BES 及 EB 的用电功率, CHP 电功率升高至 0.43; HP 输出功率较 D 点降低至 0.168;

E' 点: BES 以 0.10 的功率放电; EB 以 0.02 的热功率释热; HP 输出功率较 E 点降低至 0.182。

按照式(15)计算系统在各运行点下的 EMEC 和储能的状态变化, 如图 5 所示。

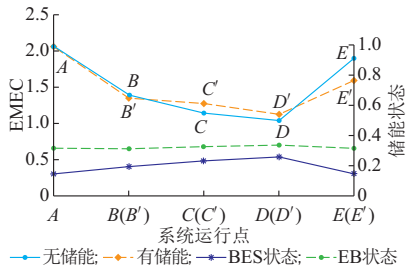


图 5 各运行点下系统 EMEC 及储能状态
Fig.5 System EMEC and stored energy status under different operation points

系统在 A, B, C, D, E 运行点下总的 EMEC 为 7.54, 在 A, B', C', D', E' 运行点下总的 EMEC 为 7.43, 降低了 1.45%。可以看出, 储能利用了系统中冗余的可再生能源发电, 同时改变了各设备的工作点, 引起系统边际能源消耗的变化, 最终降低了系统的 EMEC。

5 结语

本文建立了反映综合能源系统变工况运行特性的改进 EH 通用模型, 引入各能源转换设备效率矩阵和输出归属矩阵, 使模型可反映各设备的变工况特性, 同时在系统输入/输出端口建立了储能设备的储/释能模型, 储能的变工况特性通过储能的状态转移方程体现。本文以一个包含 PV, TR, CHP, HP, BES, EB 的系统为例, 以最小化系统 EMEC 为目标, 针对系统的静态优化调度问题对所建立模型进

行了验证。

结果表明, 由于各设备的变工况能源消耗特性, 微能源系统中可再生能源发电、电/热负荷的变化均对系统边际能源消耗造成显著的影响。同时, 利用储能可改变系统中各设备的工作点, 同时提高可再生能源的利用能力, 降低系统综合能源消耗。通过本文所建立通用模型可更准确地反映系统输入能源与输出能源的供需关系。对于系统的设备组成和容量配置问题, 需要在本文所建立模型的基础上, 进一步开展研究。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 杨经纬, 张宁, 王毅, 等. 面向可再生能源消纳的多能源系统: 述评与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(3): 11-23. DOI: 10.7500/AEPS20171002004.
YANG Jingwei, ZHANG Ning, WANG Yi, et al. Multi-energy system towards renewable energy accommodation: review and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 11-23. DOI: 10.7500/AEPS20171002004.
- [2] 邵成成, 王锡凡, 王秀丽, 等. 多能源系统分析规划初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3817-3828.
SHAO Chengcheng, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. Probe into analysis and planning of multi-energy systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3817-3828.
- [3] 吴俊宏, 谢胤喆, 储真荣. 微能源网商业运营服务产品探索[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 148-151. DOI: 10.7500/AEPS20151229101.
WU Junhong, XIE Yinzhe, CHU Zhenrong. Exploration for commercial products of micro energy grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 148-151. DOI: 10.7500/AEPS20151229101.
- [4] 甘霖, 陈瑜玮, 刘育权, 等. 含可再生能源的微网冷-热-电多能流协同优化与案例分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 275-281.
GAN Lin, CHEN Yuwei, LIU Yuquan, et al. Coordinative optimization of multiple energy flows for microgrid with renewable energy re-sources and case study[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 275-281.
- [5] HOLJEVAC N, CAPUDER T, ZHANG N, et al. Corrective receding horizon scheduling of flexible distributed multi-energy microgrids[J]. Applied Energy, 2017, 207: 176-194.
- [6] XU Xiangdong, JIA Hongjie, WANG Dan, et al. Hierarchical energy management system for multi-source multi-product microgrids[J]. Renewable Energy, 2015, 78: 621-630.
- [7] 葛少云, 李吉峰, 刘洪, 等. 考虑多能耦合及品位差异的含储能微网可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 165-173. DOI: 10.7500/AEPS20170903002.
GE Shaoyun, LI Jifeng, LIU Hong, et al. Reliability evaluation of microgrid containing energy storage system considering multi-energy coupling and grade difference[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 165-173. DOI: 10.7500/AEPS20170903002.

AEPS20170903002.

[8] EDUARDO A, MARTÍNEZ C, NICHOLAS G, et al. Techno-economic and business case assessment of multi-energy microgrids[J/OL]. Applied Energy [2017-10-20]. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.131>.

[9] GEIDL M, ANDERSSON G. Operational and structural optimization of multi-carrier energy systems [J]. European Transactions on Electrical Power, 2006, 16(5): 463-77.

[10] SCHULZE M, FRIEDRICH L, GAUTSCHI M. Modeling and optimization of renewables: applying the energy hub approach [C]// IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, November 24-27, 2008, Singapore: 83-88.

[11] AH ČIN P, ŠIKIĆ M. Simulating demand response and energy storage in energy distribution systems [C]// International Conference on Power System Technology, October 24-28, 2010, Hangzhou, China.

[12] WASILEWSKI J. Integrated modeling of microgrid for steady-state analysis using modified concept of multi-carrier energy hub[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2015, 73: 891-898.

[13] LAURA M, RAMREZ E, PAAP C. Scheduling and control framework for distribution-level systems containing multiple energy carrier systems: theoretical approach and illustrative example[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2014, 66: 194-215.

[14] PARISIO A, VECCHIO C D, VACCARO A. A robust optimization approach to energy hub management [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2012, 42: 98-104.

[15] ARNOLD M, NEGENBORN R, ANDERSSON G, et al. Model-based predictive control applied to multi-carrier energy systems[C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 26-30, 2009, Calgary, Canada.

[16] ARNOLD M, NEGENBORN R, ANDERSSON G, et al. Distributed predictive control for energy hub coordination in coupled electricity and gas networks[C]// European Control Conference (ECC), August 23-26, 2009, Budapest, Hungary.

[17] 金红光,隋军,徐聪,等.多能源互补的分布式冷热电联产系统理论与方法研究[J].中国电机工程学报,2016,36(12): 3150-3161.

JIN Hongguang, SUI Jun, XU Cong, et al. Research on theory and method of multi-energy complementary distributed CCHP system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3150-3161.

[18] 李建林,田立亭,来小康.能源互联网背景下的电力储能技术[J].电力系统自动化,2015,39(1): 15-25. DOI: 10.7500/AEPS20150906004.

LI Jianlin, TIAN Liting, LAI Xiaokang. Outlook of electrical energy storage technologies under Energy Internet background [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 15-25. DOI: 10.7500/AEPS20150906004.

[19] KRAUSE T, KIENZLE F, ART S, et al. Maximizing exergy efficiency in multi-carrier energy systems[C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 25-29, 2010, Providence, USA.

[20] LI Zhengshuo, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. Sufficient conditions for exact relaxation of complementarity constraints

for storage-concerned economic dispatch [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1653-1654.

[21] 焦阳,宋强,刘文华.光伏电池实用仿真模型及光伏发电系统仿真[J].电网技术,2010,34(11):198-202.

JIAO Yang, SONG Qiang, LIU Wenhua. Practical simulation model of photovoltaic cells in photovoltaic generation system and simulation[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 198-202.

[22] 刘瑶.光伏并网变流器损耗分析与优化设计[D].北京:北京交通大学,2011.

LIU Yao. Loss analysis and optimization design of photovoltaic grid-connected converter [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.

[23] 秦渊,杨洁,吕春杰.基于颜巴赫燃气内燃机的分布式能源系统变工况特性研究[J].分布式能源,2014,35(2):1-3.

QIN Yuan, YANG Jie, LÜ Chunjie. Analysis of the off-design performance of DES based on JMS gas engine[J]. Distributed Energy, 2014, 35(2): 1-3.

[24] 郑剑娇,郭培军,隋军,等.烟气吸收式能源互联网技术形态与关键技术[J].工程热物理学报,2012,33(8):1275-1278.

ZHENG Jianjiao, GUO Peijun, SUI Jun, et al. Technology form and key skill of flue gas absorption energy internet[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(8): 1275-1278.

[25] UNDERWOOD C. Advances in ground-source heat pump systems[M]. UK: Woodhead Publishing, 2016, 387-421.

[26] KENNAI E, BANNISTER P. Simple, fully featured boiler loop modelling [C]// Eleventh International IBPSA Conference, July 27-30, 2009, Glasgow, Scotland: 428-433.

[27] WU Z, ZHANG J, JIANG L, et al. The energy efficiency evaluation of hybrid energy storage system based on ultra-capacitor and LiFePO₄ battery[J]. WSEAS Transactions on Systems, 2012, 11(3): 95-105.

[28] DOLANP S, NEHRIR M, GEREZ V. Development of a Monte Carlo based aggregate model for residential electric heater loads[J]. Electric Power System Research, 1996, 36: 29-35.

[29] 朱成章.关于我国电力与一次能源的比例关系[J].电力技术经济,2003,5:14-17.

ZHU Chengzhang. On the relationship between the proportion of primary energy and electricity in China[J]. Electric Power Technologic Economics, 2003, 5: 14-17.

李建林(1976—),男,博士,教授级高级工程师,主要研究方向:大规模储能应用技术、新能源发电并网技术。E-mail: lijianlin@epri.sgcc.com.cn

田立亭(1983—),女,通信作者,博士研究生,高级工程师,主要研究方向:能源互联网规划、主动配电网规划、大规模储能应用技术。E-mail: tianliting@tsinghua.edu.cn

程林(1973—),男,副教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统可靠性理论及关键技术、能源互联网规划。E-mail: chenglin@tsinghua.edu.cn

(编辑 鲁尔姣)

(下转第 49 页 continued on page 49)

Optimal Planning of Micro-energy System Considering Off-design Performance

Part One General Model and Analysis

LI Jianlin¹, TIAN Liting^{1,2}, CHENG Lin², GUO Jianbo¹

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Micro-energy system is one of the important forms for the development and application of Energy Internet. A micro-energy system is a multi-input and multi-output system with a coupling relationship constituted by energy conversion and storage devices. These devices usually have non-linear working characteristics, which means deviation from the design performance. A static coupling model is established considering the nonlinear relationship between the input and output of a multi-energy microgrid. At the same time, the state transfer equation for energy storage is given. The integrated energy consumption of the system is defined by unified input energy. And a load dispatch scheme of energy conversion devices based on incremental rate is proposed. Finally, the model is applied and validated in a system which includes photovoltaic, distribution transformer, combined heat power generation, heat pump, battery storage and regenerative electric boiler. The proposed general model considering off-design performance of devices provides the basis for optimal design and operation of micro-energy system.

The work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2017YFB0903300), National Natural Science Foundation of China (No. 51777197) and State Grid Corporation of China (No. DG71-18-012).

Key words: micro-energy system; off-design performance; energy hub; energy storage; incremental rate