



综合能源系统故障态经济性最优运行策略

刘育权¹, 陈旭东², 熊文¹, 王莉¹, 陈东文², 李勇²

(1. 广州供电局有限公司, 广东 广州 510620;

2. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要: 针对工厂提出了一种以多能转供为核心的综合能源系统故障态运行策略。首先, 基于可测参数对各供能设备进行建模, 建立了综合能源系统模型。而后提出了各类供能设备出现故障时最大供能能力计算方法, 得到各设备出力约束条件, 并建立冷热电多种能源的功率及能量平衡方程。进而以运行费用最低为优化目标, 采用线性规划法对目标函数进行求解。最后以某工厂综合能源系统为算例, 分析了不同故障条件下采用该策略后各设备出力变化的合理性, 结果发现该策略具有 3 个特点: 低负荷时运行成本控制效果显著; 本策略调控效果主要受分时能源价格影响; 最大外购资源曲线具有预测故障后成本变化趋势的作用。

关键词: 综合能源系统; 故障态; 多能转供; 运行策略优化

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019162

Economical operation strategy of integrated energy system under fault state

LIU Yuquan¹, CHEN Xudong², XIONG Wen¹, WANG Li¹, CHEN Dongwen², LI Yong²

1. Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou 510620, China

2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract: A fault-state operation strategy for integrated energy systems based on multi-energy transfer was proposed. Firstly, an integrated energy system model was built to model each energy-supply device in the system using actual measurable parameters. Then, the calculation method of maximum energy supply capacity when energy-supply device fails was introduced, and the power constraint conditions of each equipment were obtained, and the power balance equations of cold/heat/electricity power were established. Then, set the lowest operating cost as the optimization goal, the objective function was solved by the linear programming method. Finally, taking a factory-level integrated energy system as an example, the rationality of the output changes of each equipment after using this strategy under several fault conditions was analyzed. It is pointed out that the strategy has three characteristics: the cost control effect is significant at low load situation, remarkably impacted by time-sharing energy prices, the outsourcing resource curve can predict the change of operating costs when fault occurs.

Key words: integrated energy system, fault-state, multi-energy transfer, optimality of operation strategy

收稿日期: 2019-03-01; 修回日期: 2019-05-29

通信作者: 李勇, liyo@sjtu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2016YFB0901300)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2016YFB0901300)



1 引言

综合能源系统具有多能源协同优化的特性,利用时空方面的耦合机制,不仅可以实现能源互补,提高可再生能源的可靠性;还能实现能源的梯级利用,从而提高能源利用效率^[1]。目前关于综合能源系统的研究大多集中在系统的配置、控制策略、容量设计以及评价指标等方面。例如,Karaki^[2]和 Kaur^[3]等人利用概率统计方法预测可再生能源分布特点,建立了一个包含太阳能、风能和电池蓄能的可再生能源系统;Kanasepatil 等人^[4]开发出了一套高效的农村综合能源系统设计算法;Gupta 等人^[5]考虑了季节变化对系统容量设计的影响;Upadhyay 等人^[6]从技术、经济、社会政治及环境因素 4 个方面对综合能源系统进行了评价等。

而在综合能源系统发生故障时的供能保障方面很少有人研究。例如,当制冷系统、供热系统发生故障时,通常系统自身会根据返回的流量、温度、压力等参数的变化,检测出故障并报警,同时根据参数进行自我优化控制,并等待人工处理与修复^[7-10]。电力系统发生故障时,通常也有自身的一套故障诊断、定位、隔离和修复办法^[11-14]。由此可见,常规的故障处理通常围绕某一设备自身的故障进行处理,同时启用备用设备,而没有考虑从整个系统多种能源相互替代的层面上进行优化调度,实现供能恢复。

基于综合能源系统具有多种能量形式互补的特性^[15],当系统冷/热/电供能组件出现故障导致供能缺额时,通过多能转供及合理分配各设备出力来保障供能可靠性,具有重要的研究意义。因此,针对工厂提出了一种以多能转供为核心,以最大供能能力为约束,以经济性最优为目标的综合能源系统故障态运行策略。并通过算例,分析了不同故障情况下采用该策略后各设备出力变化的合理性及该策略的调控特点。

2 综合能源系统模型建立

本文的研究对象为包含中央空调、冰蓄冷制冷系统、燃气锅炉、蓄热器、吸收式制冷机、燃气轮机、光伏电池、蓄电池和风力发电机的综合能源系统。该系统主要通过自主发电来满足电负荷需求,采用并网不上网运行模式。同时园区内存在大型冷热联供系统,必要时,园区内的工业用户可向冷热电联供系统购买蒸汽和冷量,以满足负荷需求。购买的冷热电量在下文统一称为外购资源。典型工厂综合能源系统的设备架构如图 1 所示。

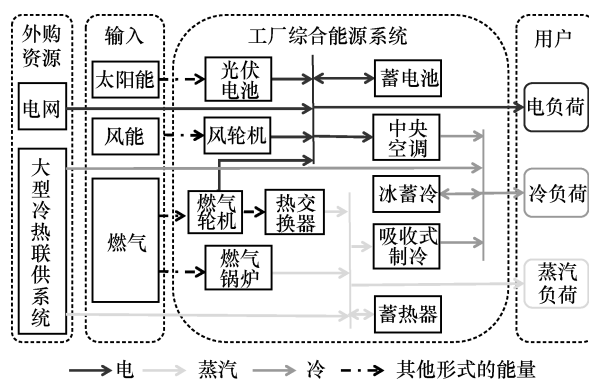


图1 工厂综合能源系统的结构及能量流动示意图

此架构包含输入、工厂综合能源系统和外购资源 3 个部分。输入主要包括太阳能、风能和燃气,是工厂所有的能量来源。综合能源系统的主要任务是完成对多种能源的稳定传输及合理分配,其中包括 3 种储能设备实现“移峰填谷”的作用。外购资源是保障工业用户供应正常生产运作所需能源的最后调节手段,由外部能源系统直接供给用户所需类型的能源。

为了使综合能源系统在故障状态下,能以一种最经济的方案运行,本文提出了一种以经济性最优为目标的综合能源系统故障态运行策略。策略中所包含的各设备模型将在下文介绍。

2.1 供冷设备模型

(1) 中央空调系统

中央空调是一种使用电能将热量从室内排向

外界环境的节能装置^[16]。其 t 时刻总的空调制冷功率为:

$$P_{c,ac}^t = \sum_{n_{ac}} \rho C q_{v,ac,i}^t \Delta T_{ac,i}^t \quad (1)$$

其中, n_{ac} 为中央空调台数, ρ 、 C 、 $q_{v,ac,i}$ 和 $\Delta T_{ac,i}$ 分别为水的密度、水的比热容、第 i 台中央空调在 t 时刻的冷冻水流量和供回水温差。 t 时刻中央空调总的用电功率为:

$$P_{e,ac}^t = \sum_{n_{ac}} \frac{\rho C q_{v,ac,i}^t \Delta T_{ac,i}^t}{COP_{ac,i}} \quad (2)$$

其中, $COP_{ac,i}$ 为第 i 台中央空调的制冷系数。

(2) 冰蓄冷制冷系统

冰蓄冷制冷系统利用夜间低谷电将水制成冰, 利用冰的相变潜热进行冷量的储存。而后在白天冷负荷需求增大时融冰供冷, 以达到“移峰填谷”的作用。其 t 时刻总的制冷功率为:

$$P_{c,cs}^t = \sum_{n_{cs}} \rho C q_{v,cs,i}^t \Delta T_{cs,i}^t \quad (3)$$

t 时刻冰蓄冷系统总的用电功率为:

$$P_{e,cs}^t = \sum_{n_{cs}} \frac{\rho C q_{v,cs,i}^t \Delta T_{cs,i}^t}{COP_{cs,i}} \quad (4)$$

式(3)和式(4)中各参数意义可参照式(1)和式(2)。

(3) 吸收式制冷系统

吸收式制冷机组是以蒸汽或高温热水为动力的制冷设备, 其 t 时刻总的制冷功率为:

$$P_{h,xc}^t = \sum_{n_{xc}} \rho C q_{v,xc,i}^t \Delta T_{xc,i}^t \quad (5)$$

t 时刻总的耗热功率为:

$$P_{e,xc}^t = \sum_{n_{xc}} \frac{\rho C q_{v,xc,i}^t \Delta T_{xc,i}^t}{COP_{xc,i}} \quad (6)$$

式(5)和式(6)中各参数意义可参照式(1)和式(2)。

2.2 供蒸汽设备模型

(1) 燃气锅炉

燃气锅炉燃烧燃气产生蒸汽或热水, 是一种常

见的能量转换装置, 其 t 时刻总的蒸汽热功率为:

$$P_{gb}^t = h_{steam} \sum_{n_{gb}} q_{m,gb,i}^t \quad (7)$$

其中, n_{gb} 、 h_{steam} 和 $q_{m,gb,i}$ 分别为设备的台数、饱和蒸汽变为饱和水所释放的热量 and t 时刻第 i 台燃气锅炉输出蒸汽的体积流量。

(2) 蓄热器

蓄热器是一种以水/蒸汽为储热介质的蒸汽容器, 在产汽量大于用汽量时将多余的蒸汽储存起来, 反之则输出蒸汽, 其 t 时刻总的蒸汽输出功率为:

$$P_{hs}^t = h_{steam} \sum_{n_{hs}} q_{m,hs,i}^t \quad (8)$$

其中, 各参数意义可参照式(7)。

2.3 供电设备模型

(1) 光伏电池

光伏电池是一种通过“光生伏特”效应直接把光能转化成电能的设备。其 t 时刻发电功率为:

$$P_{pv}^t = P_{solar}^t \sum_{n_{pv}} \eta_{pv,i} S_{pv,i} \quad (9)$$

其中, P_{solar}^t 、 n_{pv} 、 $\eta_{pv,i}$ 和 $S_{pv,i}$ 分别为 t 时刻太阳辐照、光伏电池数量、第 i 个电池的效率和面积。

(2) 风力发电机

风力发电机将风能转换为机械功, 带动转子旋转, 最终输出交流电。其 t 时刻总的发电功率为:

$$P_{wt}^t = 0.5 \rho_{air} \sum_{n_{wt}} \eta_{wt,i} v_w^3 S_{wt,i} \quad (10)$$

其中, n_{wt} 、 v_w^3 、 $\eta_{wt,i}$ 和 $S_{wt,i}$ 分别为风轮机数量、 t 时刻当地风速、第 i 台风轮机发电效率和风轮掠过的面积。

(3) 燃气轮机发电机

燃气轮机是以连续流动的气体为工质带动叶轮高速旋转, 将燃料的能量转变为有用功的内燃式动力机械。其 t 时刻发电功率为:

$$P_{gt}^t = \gamma_{gas} \rho_{gas} \sum_{n_{gt}} \eta_{gt,i} q_{v,gas,i}^t \quad (11)$$

其中, γ_{gas} 、 ρ_{gas} 、 $\eta_{gt,i}$ 和 $q_{v,gas,i}^t$ 分别为燃气热值、燃气密度、燃气轮机效率和燃气体积流量。



3 综合能源系统故障态运行策略

系统的故障态是指系统在运行过程中，由于内部设备工作异常，使系统无法达到正常出力的工作状态。只要系统运行中设备发生故障，即采用故障态运行策略。该策略通过计算不同供能设备在故障时的最大供能能力及运行成本，建立各设备供能约束条件、功率及能量平衡方程和运行成本最低的目标函数，使用线性规划法得到经济性最优的故障态运行方案。

若要优化故障态系统各设备出力，首先需要计算设备最大供能能力。而计算最大供能能力需要判断设备是否发生供能故障。由于综合能源系统包含众多设备，判断设备故障依据也大不相同，且故障和现象之间映射关系复杂。因此本策略将故障判断简化为对输出结果的判别，即不管设备具体发生了什么故障，最后对设备故障的处理结果统一分为两种情况：停机维修；继续运行。

3.1 最大供能能力计算

当设备故障处理结果为停机维修时，将其最大供能能力归零，直至设备恢复；当设备故障处理结果为继续运行时，根据监测参数逐时计算该设备最大供能出力，作为综合能源系统故障态运行策略的输入，直至恢复。

(1) 供冷设备最大供能能力计算方法

由于供冷设备计算模型相似，其 t 时刻最大供能能力可由式 (12) 表示：

$$P_{c,\max}^t = \begin{cases} 0, & \text{停机维修} \\ P_{c,\text{con}}^t - mC \frac{(\Delta T^t - \Delta T_{\text{aim}})}{2\Delta t}, & \text{继续运行} \end{cases} \quad (12)$$

其中， $P_{c,\text{con}}^t$ 、 ΔT^t 、 m 、 C 、 ΔT_{aim} 和 Δt 分别表示为 t 时刻用户用能需求、实际冷冻水供回水温差、介质质量、换热介质比热容、目标冷冻水供回水温差和参数测量时间间隔。

(2) 供蒸汽设备最大供能能力计算

与供冷设备类似处理，供蒸汽设备 t 时刻最

大供能能力为：

$$P_{h,\max}^t = \begin{cases} 0, & \text{停机维修} \\ q_m^t \cdot h_{\text{steam}}, & \text{继续运行} \end{cases} \quad (13)$$

其中， q_m^t 是指 t 时刻设备实际蒸汽输出量。

(3) 供电设备最大供能能力计算

供电设备采用当前实际用电功率作为该时刻最大供能能力：

$$P_{e,\max}^t = \begin{cases} 0, & \text{停机维修} \\ P^t, & \text{继续运行} \end{cases} \quad (14)$$

其中， P^t 为 t 时刻该设备实际供电功率。

3.2 各个供能设备自身的供能能力约束

设备正常运行时的最大供能功率为额定功率，最小供能功率为启动负荷。若发生故障，则最大供能功率可由第 2.1 节计算得到。 t 时刻各设备出力范围表示如下：

$$P_{\min}^t \leq P^t \leq P_{\max}^t \quad (15)$$

对于储能设备，还有额外一个约束：

$$S_{\min} \leq S^t \leq S_{\max} \quad (16)$$

其中， $S_{\min}$ 和 $S_{\max}$ 分别为储能设备的容量下限和容量上限。 S^t 则是 t 时刻储能设备的储能数量。

3.3 功率平衡约束

进行冷热电供能时，各供能设备需要满足实时功率平衡，建立冷、热、电功率平衡方程如下：

$$\begin{cases} \text{冷平衡: } P_{c,\text{ac}}^t + P_{c,\text{cs}}^t + P_{c,\text{xc}}^t + P_{c,\text{o}}^t = P_{\text{C}}^t \\ \text{热平衡: } P_{\text{gb}}^t + P_{\text{hs}}^t - P_{\text{h,xc}}^t + P_{\text{h,o}}^t = P_{\text{H}}^t \\ \text{电平衡: } -P_{e,\text{ac}}^t - P_{e,\text{cs}}^t + P_{\text{gt}}^t + P_{\text{pv}}^t + P_{\text{es}}^t + P_{\text{wt}}^t + P_{e,\text{o}}^t = P_{\text{E}}^t \end{cases} \quad (17)$$

其中， P_{C}^t 、 P_{H}^t 和 P_{E}^t 分别为 t 时刻该工厂的冷、热、电负荷， $P_{c,\text{o}}^t$ 、 $P_{\text{h,o}}^t$ 和 $P_{e,\text{o}}^t$ 为从外界输入的购冷功率、购热功率和购电功率。

3.4 各供能系统供能成本

该策略供能成本主要计算各设备的燃料成本。

(1) 用电设备

中央空调、冰蓄冷制冷空调和蓄电池的供能成本如式 (18) 所示：

$$C_{e_device}^t = \frac{C_e^t}{\eta_e} \quad (18)$$

其中, C_e 代表 t 时刻的电价 (或发电价格), η_e 表示设备效率: 对于中央空调, η_e 为能效比; 对于冰蓄冷系统, η_e 为制冷机组能效比和释冷效率的乘积; 对于蓄电池, η_e 为蓄电池充放电效率的乘积。

(2) 用热设备

吸收式制冷、蓄热器的供能成本用式 (19) 计算:

$$C_{h_device}^t = \frac{C_h^t}{\eta_h} \quad (19)$$

其中, C_h 代表 t 时刻的蒸汽价格 (制蒸汽价格), η_h 表示设备效率: 对于吸收式制冷, η_h 为制冷量与耗热量之比; 对于蓄热器, η_h 为充放蒸汽效率的乘积。

(3) 用气设备

燃气轮机和燃气锅炉的供能成本用式 (20) 计算:

$$C_{g_device}^t = \frac{C_g^t}{\eta_g \gamma_{gas}} \quad (20)$$

其中, C_g 代表 t 时刻的天然气价格, γ_{gas} 表示天然气热值, η_g 表示设备效率: 对于燃气轮机, η_g 为发电效率; 对于燃气锅炉, η_g 为供热效率。

(4) 可再生能源发电设备

光伏电池和风力发电机的能源成本近似为零。

3.5 目标函数

为了简化目标函数表达和方便设备的增减, 此处将各供能设备的出力和成本以矩阵的形式表示:

$$P^t = [P_{AC}^t P_{CS}^t P_{GB}^t P_{HS}^t P_{XC}^t P_{GT}^t P_{PV}^t P_{ES}^t P_C^t P_H^t P_E^t]^T \quad (21)$$

其中, P^t 表示为各设备 t 时刻的实时供能功率。

$$C^t = [C_{AC}^t C_{CS}^t C_{GB}^t C_{HS}^t C_{XC}^t C_{GT}^t C_{PV}^t C_{ES}^t C_{WT}^t C_C^t C_H^t C_E^t] \quad (22)$$

其中, C^t 表示各设备 t 时刻的实时成本。

则各个设备在 t 时刻运行成本最低的目标优化函数为:

$$\min: \text{obj} = \sum C^t \cdot P^t \quad (23)$$

4 算例分析

本文以广州某工业园区内一大型工厂为研究对象进行算例分析。光伏和风能的逐时数据来源于瑞士 METEONORM 气象资料数据库, 储能设备均在夜间生产负荷较小时 (0:00–8:00) 储能, 白天优先供能, 直至设备达到最低剩余容量停止供能。该工厂每 15 min 检测一次运行参数, 其一天内的故障发生情况见表 1。

表 1 工厂故障发生情况

设备名	运行参数异常情况	故障发生时间
燃气锅炉	蒸汽流量由额定 15 t/h 变为 7 t/h	4:00–6:00
燃气轮机	发电功率由额定 10 MW 变为 6 MW	16:00–20:00
中央空调	制冷量由 6 MW 降为 3.67 MW	18:00–21:00

4.1 供热设备故障分析

各供热 (用热) 设备一天的输出功率变化情况如图 2 所示。10:00–18:00 为热负荷高峰期, 其他时段热负荷较为平稳。系统正常运行时, 按照经济性原则, 以蓄热器 (除蓄热时段)、燃气锅炉、外购热量的顺序供热。4:00–6:00, 燃气锅炉的最大供能力由 11.5 MW 降为 5.25 MW, 为了满足工厂热负荷, 通过减小蓄热器蓄热功率增加外购热功率实现热负荷平衡。燃气锅炉故障不会降低吸收式制冷用热功率的原因是由于使用外购热量供给吸收式制冷的成本仍然要低于直接外购冷量成本, 故仍然优先使用吸收式制冷机组供冷。

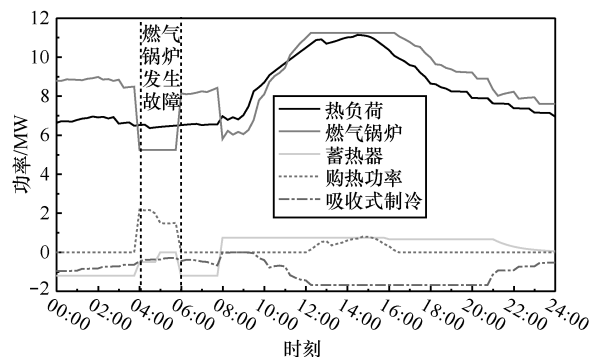


图 2 各供热 (用热) 设备功率变化



4.2 发电设备故障分析

工厂各发电（用电）设备一天的输出功率变化情况如图 3 所示。用电高峰主要集中在 10:00–20:00。系统正常运行时，按照经济性，以风力发电机、光伏电池、蓄电池（除蓄电时段）、燃气轮机、外购电量的顺序供电。16:00–20:00，燃气轮机最大供能能力由 10 MW 降为 6 MW，由于燃气轮机在所有发电设备中的发电比例较大，发电本身又会影响用电设备，且处于用电高峰期，可控空间小，因此对供电影响较大。在蓄电池、风力发电机和光伏电池的出力已无法提高的情况下，为了满足工厂电负荷，只能向外购电。值得注意的是，由于中央空调的用电来源由燃气轮机部分转变成了外购电量，运行成本开始高于外购冷量。故中央空调供能部分转为外购冷量。17 时，电价降低，重新将外购冷量转为中央空调供冷。20 时，燃气轮机恢复工作，停用最不经济的外购电量，改为燃气轮机出力。

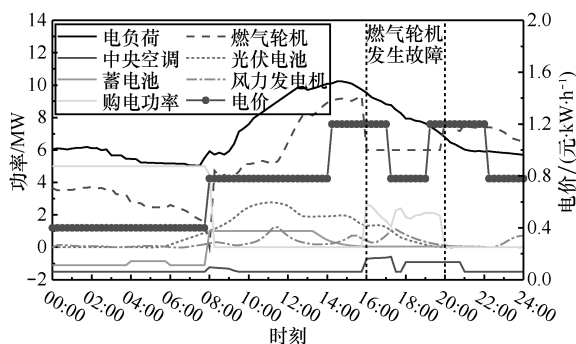


图 3 各发电（用电）设备功率变化情况

4.3 制冷设备故障分析

各制冷（蓄冷）设备一天的输出功率变化情况如图 4 所示。由图 4 可知，11:00–18:00 为负荷高峰期。系统正常运行时，按照经济性原则，以冰蓄冷（除蓄冷时段）、中央空调、吸收式制冷机组、外购冷量的顺序供冷。18:00–21:00，空调的最大供能能力由 6 MW 降为 3.67 MW，在 18:00–20:00 期间，中央空调和燃气轮机同时发生故障。由于冰蓄冷已无供冷能力，而吸收式制冷

出力已达最大，只能向外购得冷量。19 时电价升高，因电负荷、冷负荷已采用优先级最低的外购资源，故电价上升对各设备出力未产生影响。21 时中央空调故障修复完成，且此时负荷已降低，根据经济性，优先停用外购冷量，其次降低吸收式制冷机组出力。

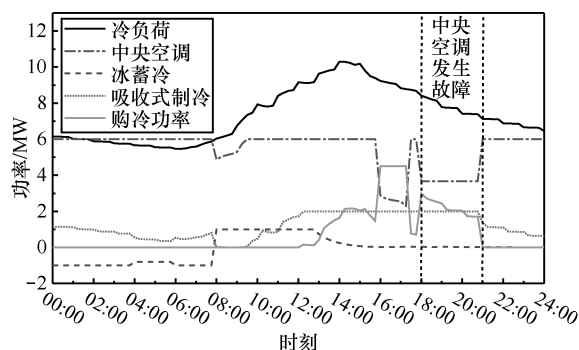


图 4 各制冷（蓄冷）设备功率变化情况

4.4 日运行成本分析

为了体现该策略的经济性调控特点，此处通过同样的方法模拟了未发生故障和全部采用外购资源的情况，与前文发生故障时进行对比分析，三者的日运行成本分别为 37.44 万元、44.19 万元和 77.82 万元。日运行成本曲线如图 5 所示。图 5 中 I、II、IV 区域为单故障情况，III 区域为双故障情况。从图 5 可以发现策略具有以下几个特点。

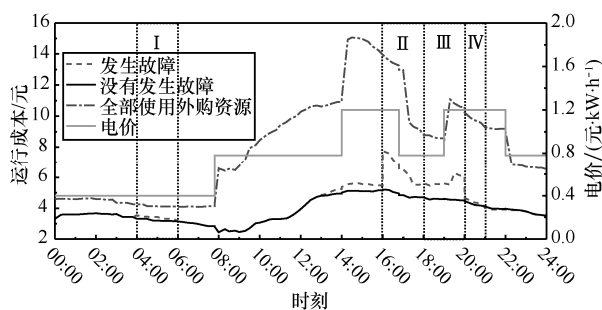


图 5 工厂一天成本变化曲线

（1）本策略更适合应用于低负荷状况下的故障态运行

低负荷状况故障态运行时，运行成本几乎不发生变化，而高负荷故障态运行时，运行成本明

显提高。这是因为在低负荷状况下,各设备出力较小、运行成本较低。即使发生故障,还有很大的可调控空间,除非发生较为严重的故障,否则不会调用特别昂贵的资源来保证供能可靠性。

(2) 本策略经济性调控效果主要受分时能源价格影响

在区域Ⅱ内,燃气轮机发生故障,相对于未发生故障的情况而言,运行成本急剧增加;在区域Ⅲ内,燃气轮机和中央空调同时发生故障。而此时运行成本的增幅反而减小。这主要是由于17时电价下降了35%,减小了燃气轮机故障对运行成本的影响程度。由此可见电价的减小使策略经济性调控效果显著加强。同时结合前文的分析,除了电价,故障对运行成本的影响程度还取决于设备容量占有所有设备容量总和的比重、与负荷的匹配情况、设备的供能类型等。因此制定故障态运行策略时,应充分考虑多种因素的影响,尤其是能源价格浮动。

(3) 全部使用外购资源曲线具有预测作用

发生故障的曲线变化趋势与全部使用外购资源曲线相吻合。这是由于本策略在故障发生时,需使用优先级更低、运行成本更高的设备来填补供能缺额,因此故障发生时,运行成本曲线将会向全部使用外购资源(优先级最低)曲线趋近,即对故障发生后的运行成本变化具有预测作用。

5 结束语

本文针对工厂提出了一种以多能转供为核心的综合能源系统故障态运行策略。在系统发生故障时,以经济性最优为目标,以所有设备最大供能能力和冷热电功率平衡为约束,通过多能转供的方法合理优化各设备出力,填补供能缺额,保障系统供能可靠性。最后以某工厂综合能源系统为算例,分析了供热设备故障、供电设备故障、供冷设备故障和两种设备同时故障场景下各设

备出力变化的合理性,同时指出该策略经济性调控具有3个特点。

由于本文在进行故障态运行算例时,仅考虑发生故障时可以通过多能转供的方法满足负荷的情况。当多能转供也无法满足负荷需求时,如何调整策略或如何切断可中断负荷,是本文下一步亟待解决的问题。

参考文献:

- [1] 彭克,张聪,徐丙垠,等.多能协同综合能源系统示范工程现状与展望[J].电力自动化设备,2017,37(6):3-10.
PENG K, ZHANG C, XU B Y, et al. Status and prospect of pilot projects of integrated energy system with multi-energy collaboration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 3-10.
- [2] KARAKI S H, CHEDID R B, RAMADAN R. Probabilistic performance assessment of autonomous solar-wind energy conversion systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(3): 766-772.
- [3] KAUR T, SEGAL R. Designing rural electrification solutions considering hybrid energy systems for papuanew guinea [J]. Energy Procedia, 2017(110): 1-7.
- [4] KANASEPATIL A B, SAINI R P, SHARMA M P. Sizing of integrated renewable energy system based on load profiles and reliability index for the state of Uttarakhand in India[J]. Renewable Energy, 2011, 36(11): 2809-2821.
- [5] GUPTA A, SAINI R P, SHARMA M P. Steady-state modelling of hybrid energy system for off grid electrification of cluster of villages[J]. Renewable Energy, 2010, 35(2): 520-535.
- [6] UPADHYAY S, SHARMA M P. A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 38(5): 47-63.
- [7] 付小平,杨洪兴,安大伟.中央空调系统运行管理[M].北京:清华大学出版社,2001.
FU X P, YANG H X, AN D W. Central air conditioning system operation management [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.
- [8] 戴永庆.溴化锂吸收式制冷技术及应用[M].北京:机械工业出版社,2000.
DAI Y Q. Lithium bromide absorption refrigeration technology and its application [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2000.
- [9] 辛广路.工业锅炉运行与节能减排操作实务[M].北京:机械工业出版社,2015.
XIN G L. Practice of industrial boiler operation and energy saving and emission reduction operations [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2015.
- [10] 董龙.热水采暖系统的供热故障分析[J].城市建设理论



研究, 2012(25).

DONG L. Analysis of heating failure of hot water heating system[J]. Urban Construction Theory Research, 2012(25).

- [11] 李斌, 何佳伟, 冯亚东, 等. 多端柔性直流电网保护关键技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 2-12.

LI B, HE J W, FENG Y D, et al. Key technologies of multi-terminal flexible DC grid protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 2-12.

- [12] 严佳梅, 许剑冰, 倪明, 等. 通信系统中断对电网广域保护控制系统的影响[J]. 电力系统自动化, 2016(5): 17-24.

YAN J M, XU J B, NI M, et al. Influence of communication system interruption on wide-area protection and control system of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016(5): 17-24.

- [13] 郭创新, 朱传柏, 曹一家, 等. 电力系统故障诊断的研究现状与发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 98-103.

GUO C X, ZHU C B, CAO Y J, et al. Research status and development trend of power system fault diagnosis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 98-103.

- [14] 刘健, 倪建立, 杜宇. 配电网故障区段判断和隔离的统一矩阵算法[J]. 电力系统自动化, 1999(1): 31-33.

LIU J, NI J L, DU Y. A unified matrix algorithm for fault segment judgment and isolation in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999(1): 31-33.

- [15] 艾芊, 郝然. 多能互补、集成优化能源系统关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化, 2018(4): 2-10.

AI Q, HAO R. Key technologies and challenges of multi-energy complementary and integrated optimization of energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018(4): 2-10.

- [16] 姚杨, 马最良. 浅议热泵定义[J]. 暖通空调, 2002, 32(3): 33.

YAO Y, MA Z L. Discussion on heat pump definition [J]. HVAC, 2002, 32(3): 33.

[作者简介]



刘育权 (1971-), 男, 博士, 广州供电局有限公司教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统分析、智能电网、综合能源系统优化调度。



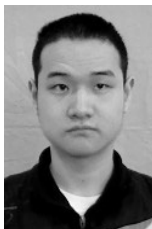
陈旭东 (1993-), 男, 上海交通大学机械与动力工程学院硕士生, 主要研究方向为综合能源系统故障态运行方案。



熊文 (1973-), 男, 博士, 广州供电局有限公司教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统分析、智能电网、综合能源系统优化调度。



王莉 (1969-), 女, 广州供电局有限公司高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护、智能电网、综合能源系统优化调度。



陈东文 (1993-), 男, 上海交通大学机械与动力工程学院博士生, 主要研究方向为综合能源系统规划、综合能源系统故障处理。



李勇 (1969-), 男, 博士, 上海交通大学机械与动力工程学院副教授, 主要研究方向为综合能源系统规划、综合能源系统优化控制。