



考虑蓄能热惯性的综合能源系统阶段式故障优化供能策略

王莉¹, 陈东文², 李俊格¹, 曾顺奇¹, 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: 利用综合能源系统中多能转换协同供能的优势以及蓄冷/蓄热系统的热惯性特点, 以实现供能系统故障时的快速恢复供能。分析多能流在各类能源转换设备中转换的功率关系, 对各类能源转换设备的输入功率进行控制以实现协同运行, 并分析各类能源转换设备的动态响应时间和蓄冷/蓄热设备考虑热惯性时的蓄能容量弹性调节方法, 以动态响应时间最短为运行策略的优化目标, 实现多能源转换设备故障时供能的优先级及供能功率的优化匹配, 得到最终的优化运行策略。算例结果表明, 多能协同与储能容量的弹性调节能够快速应对各类场景下的供能故障, 实现小时级的供能延长和综合能源系统供能故障时的快速供能恢复。

关键词: 多能流转换; 动态响应时间; 热惯性; 运行策略优化; 供能故障快速恢复

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019160

Energy optimization strategy for integrated energy system considering energy storage thermal inertia

WANG Li¹, CHEN Dongwen², LI Junge¹, ZENG Shunqi¹, LI Yong²

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

2. School of Mechanical Engineering, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200240, China

Abstract: The advantages of multi energy conversion and coordination energy supply in the integrated energy system and the thermal inertia characteristics of the cold storage/thermal system were considered to realize the rapid recovery of energy supply system when the energy supply system fails. The power relationship of multi energy flow in all kinds of energy conversion equipment was studied. The import power of all kinds of energy conversion equipment was controlled to achieve cooperative operation. The dynamic response time of all kinds of energy conversion equipment and the method of energy storage capacity adjustment with thermal inertia of heat storage and heat storage equipment was analyzed. The dynamic response time were used as the target to optimize the running strategy, and the priority of energy supply and the optimal matching of power supply were realized when the multi energy conversion equipment fails, and the final optimal operation strategy was obtained. The example shows that the resilience of multi energy coordination and energy storage capacity can quickly deal with the energy supply failures in various scenes, realize energy supply extension at the hour level, and realize fast energy supply recovery in the energy supply system for integrated energy systems.

Key words: multi-flow conversion, dynamic response time, thermal inertia, optimization of operation strategy, quick recovery of energy supply failure

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

对于供能故障恢复,单类型供能系统通常的聚焦点为单类型设备,一般处理方法为启用备用设备、临时更换或维修设备。这种处理方式一般会耗费大量时间,从而影响企业的生产活动,给企业带来较大的损失^[1]。

综合能源系统作为物联网的一部分,能够有机结合各类能源供应设备,充分利用多能协同特性以实现综合效益最大化^[2-4]。考虑到综合能源系统正在逐步推广应用到各类工业园区,因此在未来的很多工业园区乃至工业企业中,将会出现大量综合能源系统,因此充分利用综合能源系统中各类能源转换设备,具有重要意义。在进行工业企业的供能故障后快速恢复这一过程中,充分利用多能协同特性,可以有效实现故障后的快速恢复供能^[5]。例如,Fu等^[6-7]研究了在综合能源系统中集中供气系统的有效性评估。Sun等^[8]研究了微型冷热电联供系统设备层热物理特性。

对于综合能源系统中供能故障快速恢复的研究,着重点在于对综合能源系统特性的研究。其中包括两点内容:多能转换机理的研究和蓄冷/蓄热系统热惯性研究。对于多能转换机理的研究,综合能源系统中对设备运行策略优化需要立足于设备层面,优化设备供能功率,同时需要理清能量流动^[9-11]。Brahman等^[12]研究了基于多能协同的综合能源系统能量优化管理。本文依据能流分析的思路,立足于设备层面,研究多能转换与运行策略优化。对与系统热惯性的研究,早在2005年秦冰等^[13]、仪忠凯等^[14]利用了热网和建筑热惯性用于热电联产系统调峰。Gu等^[15]和Zheng等^[16]随后分别对热网热惯性在建筑和与分布式发电耦合上进行了研究。但是他们的研究局限于建筑、供能管道热惯性的分钟级别的优化控制,缺乏对于储能小时级热惯性用于故障供能的研究。综合能源系统中的蓄冷、蓄热是通过中间介质形成的,

而中间介质由于具有热容,传热过程较缓慢,因此蓄冷/蓄热设备可以利用设备本身的热容,对其自身的蓄能容量在一定范围内进行弹性调节,这一点可以应用于故障后的快速恢复供能。

根据以上两个特点,本文主要研究基于多能流分析转换的、以动态响应时间最短为目标的综合能源系统故障供能快速恢复策略优化,并考虑利用蓄冷/蓄热设备的热惯性延长供能时间。

2 工业企业综合能源系统概述

2.1 工业企业用能负荷

企业的用能负荷指的是企业对于某种特定能源的需求,一般用不同时刻能源需求量来表示。常见的负荷主要包括电负荷、冷热负荷(由不同温度、压力下的换热介质所携带)、气负荷(如天然气、煤气等各类气体)。

根据不同用户在用能政策尤其是价格上的差异,一般将用户分为工业用户、民用用户、商业用户等。典型的工业用户的用能主要由工业生产决定。与其他用户用能特性相比,工业企业的负荷特性主要表现为两方面:在时间上,用能负荷的高峰期与生产加工的高峰期相重合或有一定程度的时延;在数量上,用能负荷主要受工业生产影响,受其他因素(如环境气候、人员等)影响较小。

2.2 综合能源系统供用能设备概述

对工业用户供用能设备进行运行策略优化时,首先需要确定该工业用户的供能设备类型。

为了使研究结果尽可能覆盖更多的应用场景,结果尽可能具有普适性,下面以一个典型的包含电负荷、热蒸汽负荷、冷负荷为例,展开研究。

对于该工业用户,电负荷主要由外购电、燃气轮机、汽轮机、蓄电池4类设备提供。其中,外购电指该企业从外部电网购买的电量;燃气轮机通过消耗天然气做功后带动发电机发电实现供电;蓄电池通过释放储存的电量实现供电;汽轮机通过消耗热蒸汽发电实现供电。

热蒸汽负荷主要由余热锅炉、燃气锅炉、汽轮机、吸收式制冷机、蓄热蒸汽 5 类设备供应。其中, 余热锅炉与燃气轮机相连构成热电联供 (combined heat and power, CHP), 余热锅炉利用燃气轮机发电后产生的高温废气将水加热为蒸汽实现供热蒸汽; 燃气锅炉通过消耗天然气加热水为热蒸汽实现供热蒸汽; 汽轮机消耗热蒸汽发电, 为负的热蒸汽负荷; 吸收式制冷机消耗热蒸汽供冷, 为负的热蒸汽负荷; 蓄热蒸汽通过释放热蒸汽实现供热蒸汽。

冷负荷主要由电热泵、吸收式制冷机、蓄冷 3 类设备实现供冷。电热泵通过消耗电能实现供冷; 吸收式制冷机通过消耗热蒸汽实现供冷; 蓄冷通过释放冷量实现供冷。

2.3 故障时多能协同供能策略优化

由于企业具有多种类型的能源转换设备, 各类设备之间通过协调运行, 可以在一定程度上进行供能替代与互补, 从而利用多能协同效应提高供能的可靠性与稳定性。当发生供能故障时, 利用上述各类能源转换设备, 能在一定程度上实现供能替代, 从而解决供能故障时的保障供能问题。

当发生外界供电故障时, 调节燃气轮机、蓄

电池、汽轮机 3 类设备进行供电, 从而满足该供能故障时段的供电需求; 当发生燃气锅炉供热故障时, 调节余热锅炉、汽轮机、吸收式制冷机、蓄热蒸汽 4 类设备, 从而满足供热故障时的供热需求; 当发生电热泵供冷故障时, 调节吸收式制冷机或蓄冷进行供冷, 从而满足供冷故障时的供冷需求。

在上述各类供能设备发生供能故障、采用替代设备供能时, 往往会对其他供能需求产生影响。因此, 本文致力于研究当发生供能故障时的各类供能能流的变化情况, 以及在此条件下的最优化的设备供能运行策略。

3 综合供能系统能流分析

对于包含有电、热、冷供能需求的工业企业级的综合能源系统, 该企业的综合能源系统能流图如图 1 所示。

在图 1 所示的能流图中, 输出量为电负荷、冷负荷、热负荷, 三者均来自用户的需求, 属于已知量, 分别用 L_{out}^E 、 L_{out}^C 、 L_{out}^H 表示; 输入为风、电、光、(天然) 气, 属于控制调节量, 分别用 L_{in}^{wind} 、 L_{in}^E 、 L_{in}^{sun} 、 L_{in}^{gas} 表示。输入量经过各类能源转换设备处理后转换为输出能量流出, 以满足用户供能需

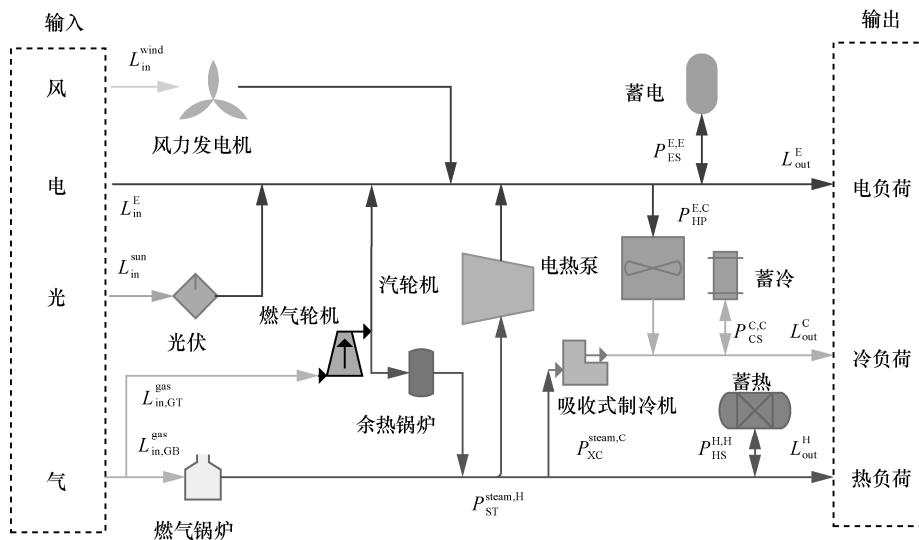


图 1 工业企业的综合供能系统能流图



求, 其中外界供电、风力发电机、光伏电池板、燃气轮机、汽轮机、燃气锅炉、吸收式制冷机、电热泵、蓄电池、蓄热蒸汽、蓄冷水等各类能源

$$A = \begin{bmatrix} \eta_{WG}^{wind,E} & \eta_{PV}^{sun,E} & 1 & \eta_{GT}^{gas,E} & \eta_{ST}^{steam,E} & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \eta_{HP}^{E,C} & 0 & 1 & \eta_{XC}^{steam,C} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1 - \eta_{GT}^{gas,E})\eta_{HB}^{steam,H} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \eta_{GB}^{gas,H} & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$X = [L_{in}^{wind,E} \quad L_{in}^{sun,E} \quad L_{in}^E \quad L_{in,GT}^{gas} \quad P_{ST}^{steam,H} \quad P_{HP}^{E,C} \quad P_{ES}^{E,E} \quad P_{CS}^{C,C} \quad P_{XC}^{steam,C} \quad L_{in,GB}^{gas} \quad P_{HS}^{H,H}]^T \quad (2)$$

$$L = [L_{out}^E \quad L_{out}^C \quad L_{out}^H]^T \quad (3)$$

式(1)~式(3)满足如下关系:

$$L = A \cdot X \quad (4)$$

其中, $\eta_{GT}^{wind,E}$ 、 $\eta_{PV}^{sun,E}$ 、 $\eta_{GT}^{gas,E}$ 、 $\eta_{ST}^{steam,H}$ 、 $\eta_{HP}^{E,C}$ 、 $\eta_{XC}^{steam,C}$ 、 $\eta_{HB}^{steam,H}$ 、 $\eta_{GB}^{gas,H}$ 分别为风发电机发电、光伏电池板发电、燃气轮机发电、蒸汽轮机发电、电热泵供热、吸收式制冷供冷、余热锅炉供热、燃气锅炉供热效率。

进行运行控制时, 控制变量为外界供电功率、风力发电机输入风力功率、光伏电池板光照功率、燃气轮机输入燃气功率、汽轮机输入蒸汽功率、燃气锅炉输入燃气功率、吸收式制冷机输入蒸汽功率、电热泵输入电功率、蓄电池释电功率、蒸汽蓄热器释热功率、释冷水功率共 11 个变量。

4 供能故障分析

4.1 动态响应时间分析

借鉴于电力系统中动态响应特性的概念, 定义综合能源系统中各类冷热供能系统的动态响应时间如下: 某一供能系统从设备启动到供能系统内各项参数恢复到正常稳定供能状态时的参数所需要的时间。根据动态响应时间差异, 主要包括两个方面: 设备机械气动时间和设备预热/冷却时间。其中设备预热/冷却时间存在两种情况: 第一种情况为各类机械设备加热/冷却到正常工作所需的温度、压力状态花费的时间; 第二种情况为加热/冷却设备内换热介质花费的时间。

转换设备输入能流功率分别用 L_{Ein} 、 $L_{wind,Ein}$ 、 $L_{sun,Ein}$ 、 $L_{gasin,GT}$ 、 $P_{steam,HST}$ 、 $L_{gas,GBin}$ 、 $P_{steam,CXC}$ 、 $P_{E,CHP}$ 、 $P_{E,EES}$ 、 $P_{H,HHS}$ 、 $P_{C,CCS}$ 表示。建立能流功率平衡计算式如下:

仅考虑设备启动时间风力发电机、光伏电池、电热泵、蓄电池、蓄热蒸汽罐、蓄冷水箱 6 类设备。设备动态响应时间为设备机械启动时间, 由实验测量或经验值确定, 分别用 $t_{0,WG}$ 、 $t_{0,PV}$ 、 $t_{0,HP}$ 、 $t_{0,ES}$ 、 $t_{0,HS}$ 、 $t_{0,CS}$ 表示, 与之对应的动态响应时间分别为 t_{WG} 、 t_{PV} 、 t_{HP} 、 t_{ES} 、 t_{HS} 、 t_{CS} 。

考虑各类设备机械启动时间与机械设备加热/冷却时间的设备为燃气轮机、蒸汽轮机两类设备。各类设备的机械启动时间分别用 $t_{0,GT}$ 、 $t_{0,ST}$ 来表示。则设备动态响应时间分别为 t_{GT} 、 t_{ST} , 计算式如下:

$$t_{GT} = t_{0,GT} + \frac{C_{GT} \cdot m_{GT} \cdot (T_{GT} - T_{am})}{P_{0,GT}} \quad (5)$$

$$t_{ST} = t_{0,ST} + \frac{C_{ST} \cdot m_{ST} \cdot (T_{ST} - T_{am})}{P_{0,ST}} \quad (6)$$

其中, C_{GT} 、 C_{ST} 分别为需要燃气轮机、蒸汽轮机需要加热的机械设备的平均比热容; m_{GT} 、 m_{ST} 分别为需要燃气轮机、蒸汽轮机需要加热的机械设备的质量; T_{GT} 、 T_{ST} 分别为正常工作时的燃气轮机、蒸汽轮机温度; T_{am} 为启动时刻的环境温度; $P_{0,GT}$ 、 $P_{0,ST}$ 分别表示用于燃气轮机和蒸汽轮机预热的加热功率。

考虑设备机械启动时间与介质加热/冷却时间的设备为燃气锅炉、余热锅炉、吸收式制冷机 3 类设备。其机械启动时间分别用 $t_{0,GB}$ 、 $t_{0,HB}$ 、 $t_{0,XC}$ 来表示, 设备动态响应时间分别为 t_{GB} 、 t_{HB} 、 t_{XC} , 计算式如下:

$$t_{GB} = t_{0,GB} + \frac{C_{GB} \cdot \rho_{GB} \cdot V_{GB} \cdot (T_{GB} - T_{am})}{P_{0,GT}} \quad (7)$$

$$t_{HB} = t_{0,HB} + \frac{C_{HB} \cdot \rho_{HB} \cdot V_{HB} \cdot (T_{HB} - T_{am})}{P_{0,HB}} \quad (8)$$

$$t_{XC} = t_{0,XC} + \frac{C_{XC} \cdot \rho_{XC} \cdot V_{XC} \cdot (T_{XC} - T_{am})}{P_{0,XC}} \quad (9)$$

其中, C_{GB} 、 C_{HB} 、 C_{XC} 分别为需要燃气锅炉、余热锅炉、吸收式制冷机待加热介质的平均比热容; ρ_{GB} 、 ρ_{HB} 、 ρ_{XC} 分别为燃气锅炉、余热锅炉、吸收式制冷机待加热介质的平均密度; V_{GB} 、 V_{HB} 、 V_{XC} 分别为燃气锅炉、余热锅炉、吸收式制冷机待加热介质的体积; T_{GB} 、 T_{HB} 、 T_{XC} 分别为正常工作时的燃气锅炉、余热锅炉、吸收式制冷机待加热介质的平均温度; T_{am} 为启动时刻的环境温度; $P_{0,GB}$ 、 $P_{0,HB}$ 、 $P_{0,XC}$ 分别表示燃气锅炉、余热锅炉、吸收式制冷机的平均加热/冷却功率。

4.2 故障时设备最大供能能力与供能缺额估算

正常运行时, 设备最大供能能力按照额定值考虑。当设备发生供能故障时, 存在两种情况: 设备停机与设备降低供能能力运行。对于第 1 种情况, 此时设备供能能力为 0; 对于第 2 种情况, 设备此时最大供能能力即当前状态下的供能功率, 需要根据供电网电流或供冷/热管道介质温度得到当前状态下的供能缺额, 再得到当前状态下的最大供能能力。设备最大供能能力计算如下:

$$P_{\max} = \begin{cases} P_0, \text{设备正常运行} \\ 0, \text{设备停机} \\ P_0 - P_{\text{van}}, \text{设备降低功率运行} \end{cases} \quad (10)$$

其中, P_0 为设备额定供能能力; P_{van} 为该时刻供能功率缺额。

对于由风力发电机、光伏电池板、燃气轮机、汽轮机构成的供电系统, 由输出的平均有效电流值 I 与正常供能条件下的目标有效电流值 I_{am} 确定, 如下:

$$P_{\text{van}} = (I_{am} - I) \cdot U \quad (11)$$

对于燃气锅炉、余热锅炉构成的供热蒸汽系统, 由供热管道的热蒸汽质量流量 M 与目标热蒸汽质量流量 M_{am} 确定, 如下:

$$P_{\text{van}} = (M - M_{am}) \cdot (h_{\text{steam}} - h_{\text{amb}}) \quad (12)$$

其中, h_{steam} 、 h_{amb} 分别表示输出蒸汽、锅炉进口热水的比焓值。

对于电热泵、吸收式制冷机构成的供冷水系统, 由于是通过供冷水系统供回水温差实现供冷的, 因此供能系统供能缺额通过供水温度变化速率确定。

$$P_{\text{van}} = \frac{\pi d^2 \cdot L \cdot C \cdot \Delta t}{8 \cdot \Delta t} \quad (13)$$

其中, d 为供冷水管道内径; L 为供冷水管道整个回路长度; C 为冷水平均比热容; Δt 两侧测量冷冻水时间间隔; ΔT 为两次时间间隔测量的供冷水出口温度差。

4.3 蓄冷/蓄热系统热惯性分析

蓄电系统惯性很小, 可以忽略不计。而蓄冷/蓄热系统通过换热介质温度变化实现蓄能。则可以利用介质的热惯性, 在应急功能状态下, 通过允许介质参数在一定程度范围内偏离标准状态, 增大蓄能容量, 以进行应急供能, 再在合适的时间重新调整回正常状态, 以实现负荷的平移。

对于蓄冷系统, 若以冷水作为换热介质, 通过调节供回水温差实现对供冷能力在一定范围内的弹性调节。考虑到蓄冷水箱与管道内冷水的蓄热特性, 可以将整个供冷水系统与蓄冷的系统的蓄冷特性折合到蓄冷系统上, 以增大蓄冷系统蓄冷容量。则蓄冷系统弹性系数定义如下:

$$k_{\text{cs}} = \frac{\pi d^2 L + V}{V} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta T_{am}} \quad (14)$$

其中, ΔT_{am} 为环境温度。对于蓄热系统, 若以热蒸汽作为蓄热介质, 则可以通过喷水以降低热蒸汽参数, 从而实现一定程度内的弹性增加蓄热系统容量。根据质量守恒和能量守恒可以得到计算式如下:



$$k_{HS} = \left(1 + \frac{h_{am} - h}{h - h_{amb}} \right) \cdot \frac{L_{out}^H}{P_{van}} \quad (15)$$

其中, h_{am} 、 h 、 h_{amb} 分别为标准供蒸汽比焓值、最低允许供蒸汽焓值、环境热水焓值。

为了便于后文分析方便, 取蓄电设备的供能弹性系数均为 $k_{ES}=1$ 。

4.4 故障时运行策略优化建模

当出现供能故障时, 对应的运行策略优化转化为数学上的优化问题。

运行时满足式 (4), 并且需要满足设备运行功率约束:

$$P_{min} \leq P \leq \min \{ P_{max}, P_{max, res} \} \quad (16)$$

其中, P_{max} 由第 3.2 节计算得到, P_{min} 为设备最小输入功率, 若设备为无级调节的设备可取 0; P 为该时刻设备的输入供能功率, 为第 2 节中的 11 个能流功率变量; $P_{max, res}$ 为考虑供能功率约束时的限定供能功率, 一般在外界输入供电功率中体现。

对于储能, 需要考虑功率约束外还需要考虑剩余储存能量的约束, 则满足下列功率约束:

$$P_{min} \leq P \leq \min \left\{ P_{max}, \frac{k \cdot S \cdot \eta_s}{\Delta t} \right\} \quad (17)$$

其中, k 为弹性系数, 对应于蓄电、蓄冷、蓄热则分别为 k_{ES} 、 k_{CS} 、 k_{HS} ; S 为容器内剩余蓄存容量; η_s 为储能释放能量效率, 对应于蓄电、蓄冷、蓄热则分别为 $\eta_{ES}^{E,E}$ 、 $\eta_{CS}^{C,C}$ 、 $\eta_{HS}^{H,H}$; Δt 为两次控制的时间间隔。

根据上述约束条件, 再选择合适的优化目标即可以进行各类设备输入功率优化。由于对于大部分用户, 发生供能故障时, 希望能尽快恢复供能。因此本研究中选择动态响应时间最短作为优化目标。

令系数矩阵为 C , 则:

$$C = [t_{WG} t_{PV} t_E t_{GT} t_{HP} t_{ES} t_{CS} t_{XC} t_{GB} t_{HS}]^T \quad (18)$$

系数矩阵 C 中各个参数表示的是各类供能设备的动态响应时间。待优化的目标函数为:

$$\min : \text{obj} = C \cdot X \quad (19)$$

在上述优化目标函数中, 当各类设备进行优化时, 往往存在同时供能的场景, 此时 obj 并非实际的累计动态响应时间。但是考虑到在优化的目标函数中, 矩阵 C 中各个元素实际作用体现为确定对应设备供能的优先级, 因此该目标函数可以实现按照动态响应时间优化供能的目的。

5 典型场景故障供能仿真与结果分析

根据上述策略模型, 下面进行典型供能故障场景分析。典型故障场景分为两类: 不考虑蓄能热惯性的电热泵供能故障与不考虑蓄能热惯性的电热泵供能故障。

各类设备的额定容量、动态响应时间及其他主要参数见表 1。

不考虑蓄能热惯性的电热泵供能故障的典型场景设定如下: 热泵在运行过程中发生了供能故障。热泵最大供能能力 6 MW 下降到 1.83 MW, 随后按照动态响应快慢的顺序依次启动蓄冷、吸收式制冷机、蓄热、燃气锅炉共 4 类相关设备。各设备对应的供能曲线如图 2 所示。

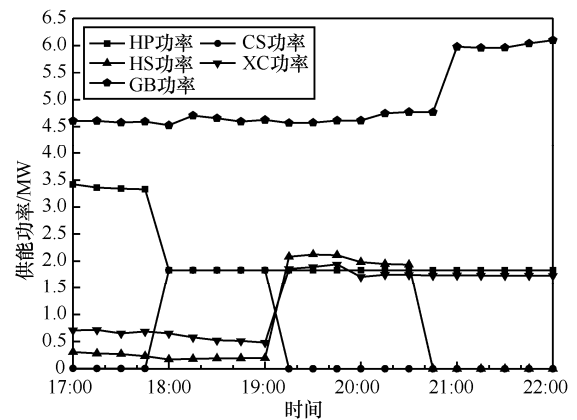


图 2 热泵故障时的各相关设备供能曲线

在图 2 中, 18 时热泵发生供能故障, 随后启动蓄冷进行应急供能, 蓄冷释放冷量功率从 0 上升为 1.83 MW, 一直持续到 19 时为止, 此时蓄冷内部剩余需冷量完全消耗完毕; 随后在

表 1 各能源转换设备主要参数

设备	主要参数设置
热泵 (HP)	额定功率: 6 MW; 目标供回水温差 5℃; 制冷效率: 4; 响应时间: 90 s
蓄冷设备 (CS)	额定蓄冷功率: 1 MW; 供冷功率: 1 MW; 目标供回水温差 8℃; 最大供回水温差 10℃ 蓄冷放冷效率: 0.85; 响应时间: 80 s
燃气锅炉 (GB)	额定供热功率: 11.5 MW; 额定蒸汽流量: 15 t/h; 响应时间: 600 s
蓄热器 (HS)	额定蓄热功率: 1.2 MW; 额定蓄热蒸汽流量: 1.6 t/h; 供热效率: 0.95 额定供热功率: 0.75 MW; 额定供热蒸汽流量: 1 t/h; 响应时间: 100 s
吸收式制冷机组 (XC)	额定功率: 2 MW; 目标供回水温差 5℃; 响应时间: 180 s
燃气轮机 (GT)	额定功率: 10 MW; 燃气轮机效率: 0.42; 响应时间: 480 s
光伏电池 (PV)	电池效率: 0.2; 光伏板总面积: 5 000 m ² ; 响应时间: 1 s
蓄电池 (ES)	额定充电功率: 1 MW; 额定放电功率: 1 MW; 充放电效率: 0.9; 响应时间: 1 s
风力发电机 (WT)	风轮掠过总面积: 5 000 m ² ; 发电效率: 0.35; 响应时间: 1 s
余热锅炉 (HB)	额定供热功率: 13 MW; 余热利用效率: 0.90; 响应时间: 600 s

19 时启动吸收式制冷机进行供能, 吸收式制冷机耗热功率从 0.48 MW 增加到 1.85 MW, 对应的需要用蓄热供应的热功率由 0.20 MW 增加到 2.08 MW; 接着 20:45 时刻蓄热用完, 启动燃气锅炉供热, 燃气锅炉消耗天然气折合热功率从 4.70 MW 上升到 6.09 MW, 用于吸收式制冷机供热。

考虑蓄能热惯性的电热泵供能故障的典型场景设定与上述场景设定相同。各设备运行情况如图 3 所示。

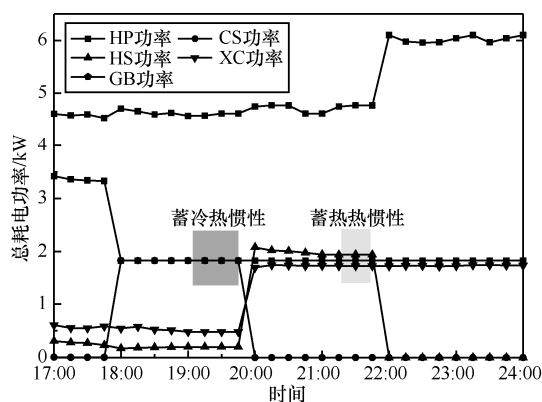


图 3 考虑蓄能热惯性的热泵故障各相关设备供能曲线

与图 2 对比, 可以发现图 3 中在 19 时以后, 增大了蓄冷系统的供回水温差, 且增大了蓄冷系统的蓄冷能力, 使得蓄冷释放冷量的时间延长了 0.75 h,

则吸收式制冷机替代供冷推迟至 19:45 才行动; 在吸收式制冷机消耗蓄热的过程中, 由于弹性增大了蓄热系统的热效率, 蓄热系统释热时间延长了 0.5 h, 因此最后燃气轮机直到 22 时才开始供应热蒸汽, 和图 2 中的燃气轮机 20:45 开始为吸收式制冷机供热相比, 推迟了 1.25 h, 有效提高了系统的抗供能故障性能。

6 结束语

本文对企业综合能源系统供能故障快速恢复技术进行了研究, 主要研究多能转换机理、多能转化用于优化策略及蓄冷/蓄热热惯性在快速恢复供能过程中的应用。建立了综合能源系统快速恢复供能的运行策略优化模型及解决方法, 最后以两类算例的形式对该运行策略进行了说明。该运行策略主要有以下两个特点。

第一, 采用基于能流分析的多能转化运行优化策略, 以动态响应时间最短作为优化目标, 能够在较短时间内进行恢复供能, 并实现不同供能设备按照响应从快到慢的接力式阶段性故障供能。

第二, 考虑到蓄冷/蓄热设备的热惯性以后, 能够有效延长蓄能设备的供能时间, 从而为故障维修或其余设备进行转供提供更充分的准备



时间。若考虑到经济效应，由于可以推迟后续设备的启动，则可以推迟高成本设备的使用以降低供能成本。另一方面，蓄能热惯性特点也可应用于优化控制。这两点内容可作为本文后续研究的方向。

参考文献：

- [1] 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. State of arts of fault diagnosis of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 98-103.
- [2] 贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2015(7): 198-207.
JIA H J, WANG D, XU X D, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015(7): 198-207.
- [3] KAUR T, SEGAL R. Designing rural electrification solutions considering hybrid energy systems for Papua New Guinea[J]. Energy Procedia, 2017(110): 1-7.
- [4] 李洁, 张东, 常洁, 等. 面向智能制造的工业连接现状及关键技术分析[J]. 电信科学, 2017, 33(11): 146-153.
LI J, ZHANG D, CHANG J, et al. Situation description and critical technology analysis for industrial connection of intelligent manufacturing[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(11): 146-153.
- [5] 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. Present situation and prospect of demonstration project of multi-energy synergy comprehensive energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 37(6): 3-10.
- [6] FU X, ZHANG X. Failure probability estimation of gas supply using the central moment method in an integrated energy system [J]. Applied Energy, 2018(219): 1-10.
- [7] FU X, GUO Q, SUN H, et al. Estimation of the failure probability of an integrated energy system based on the first order reliability method [J]. Energy, 2017, 134(9): 1068-1078.
- [8] SUN D F, SHEN L M, SUN M, et al. An effective method of evaluating the device-level thermophysical properties and performance of micro-thermoelectric coolers[J]. Applied Energy, 2018(219): 93-104.
- [9] 徐航, 董树锋, 何仲满, 等. 考虑能量梯级利用的工厂综合能源系统多能协同优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 1-8.
XU H, DONG S F, HE Z X, et al. Multi-energy cooperative optimization of integrated energy system in plant considering stepped utilization of energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 1-8.
- [10] LI G, KOU Y, JIANG J, et al. Researches on the reliability evaluation of integrated energy system based on energy hub[C]//2016 China International Conference on Electricity Distribution, Aug 10-13, 2016, Xi'an, China. Piscataway: IEEE Press, 2016.
- [11] ZHANG X, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A, et al. Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy infrastructures[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 6(5): 2302-2311.
- [12] BRAHMAN F, HONARMAND M, JADID S. Optimal electrical and thermal energy management of a residential energy hub, integrating demand response and energy storage system[J]. Energy & Buildings, 2015(90): 65-75.
- [13] 秦冰, 付林, 江亿. 利用系统热惯性的热电联产电力调峰[J]. 煤气与热力, 2005, 25(10): 6-8.
QIN B, FU L, JIANG Y. Electric peak shaving for CHP plant by using thermal inertia of heat-supply system[J]. Gas & Heat, 2005, 25(10): 6-8.
- [14] 仪忠凯, 李志民. 计及热网储热和供热区域热惯性的热电联合调度策略[J]. 电网技术, 2018, 42(5).
YI Z K, LI Z M. Combined heat and power dispatching strategy considering heat storage characteristics of heating network and thermal inertia in heating area[J]. Power System Technology, 2018, 42(5).
- [15] GU W, WU C, WANG J, et al. Optimal operation for integrated energy system considering thermal inertia of district heating network and buildings[J]. Applied Energy, 2017(199): 234-246.
- [16] ZHENG J, ZHOU Z, ZHAO J, et al. Integrated heat and power dispatch truly utilizing thermal inertia of district heating network for wind power integration[J]. Applied Energy, 2018(211): 865-874.

【作者简介】



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与优化控制、电力通信。

李俊格（1984—），男，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。

曾顺奇（1986—），男，广州供电局有限公司工程师，主要研究方向为电力系统调度。

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。