

先进绝热压缩空气储能热电联供模式下的运行可行域分析

白珈于¹, 薛小代¹, 陈来军^{1,2}, 梅生伟^{1,2}

(1. 清华大学 电机系 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084;
2. 青海大学 启迪新能源学院, 青海 西宁 810036)

摘要:大规模清洁储能技术之一的先进绝热压缩空气储能(AA-CAES)具备热电联供、联储的能力,可作为能量枢纽接入综合能源系统,以提高系统运行的灵活性,促进新能源消纳。提出了一种可直观反映AA-CAES功率约束和储能状态约束的运行可行域刻画方法,为理解AA-CAES的热电耦合关系,分析热电联供模式的运行特点,评估系统的运行灵活性、供能能力和调节裕量提供了一种可视化工具。在此基础上,研究了运行可行域的形状和特点,分析了考虑供热比变化和计及宽工况影响的运行可行域处理方法,并探讨了运行可行域作为分析工具在实时调度中的应用。以某区域综合能源系统为例,验证了所提运行可行域分析方法的有效性和实用性。

关键词:先进绝热压缩空气储能;热电联供;运行可行域;综合能源系统;热电耦合;可视化分析

中图分类号:TM 761;TK 02

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201908022

0 引言

综合能源系统通过对不同能源的协同优化,实现能源的梯级利用,可有效地解决新能源消纳难题,提高能源系统的运行效率和灵活性,有利于构建清洁低碳、经济环保的能源结构体系,是目前能源研究的热点和能源发展的趋势^[1-3]。

压缩空气储能 CAES (Compressed Air Energy Storage) 是一项极具发展潜力和应用前景的大规模物理储能技术^[4-5],近年来颇受研究人员的关注。先进绝热压缩空气储能 AA-CAES (Advanced Adiabatic CAES) 在传统 CAES 的基础上增加了热回收系统、储热装置,摒弃了化石燃料的补燃,具有储能容量大、效率高、无环境污染等优点^[6],且天然具备热电联供、联储的能力^[7-8],可作为能源转换单元和综合储能设备接入综合能源系统,提高系统运行的灵活性,解决由新能源出力波动和电、热负荷峰谷交错造成的弃风问题,实现不同能源的优势互补、高效利用^[9-10]。

近年来,国内外学者在 CAES 和 AA-CAES 电站的效益评估、容量规划、经济调度和市场运营等方面开展了大量的研究。文献[11]对分布式压缩空气储能 D-CAES (Distributed CAES) 的热电联供运行模式进行了经济性评估,结果表明 D-CAES 利用压缩余热供热具有可观的经济和环境效益。文献[12]建立了基于 CAES 固定效率模型和详细热经济性模型的

经济调度模型,并以爱尔兰地区为例对比分析了2种模型下系统总成本、弃风量和二氧化碳排放量的计算差异。文献[13]建立了考虑 AA-CAES 热力学动态过程的详细调度模型,并提出了含 AA-CAES 的微能源网经济调度策略。基于该模型,文献[14]提出了 AA-CAES 参与日前电力市场的主从博弈竞标策略,文献[15]提出了考虑 AA-CAES 备用特性的电力系统优化调度策略。

针对 AA-CAES 在电力系统和综合能源系统中的应用,目前已有一套较完备的热力学分析和系统建模方法,适用于电源规划、运行调度和市场竞标等多类优化问题。但目前尚无文献对 AA-CAES 在热电联供模式下的运行可行域进行针对性的研究,缺乏分析 AA-CAES 热电联供模式运行特点和运行策略的实用化工具,也难以对 AA-CAES 的运行灵活性、调节裕度和调度指令跟踪能力等进行评估。

本文基于 AA-CAES 的实际热力学动态过程,考虑电、热、气三者之间的耦合关系,提出了 AA-CAES 运行可行域的确定方法,在此基础上研究了运行可行域的形状、特点和影响因素,并详细分析了运行可行域在实时调度中的应用。最后以某区域综合能源系统为例,验证了本文所提运行可行域分析方法的有效性和实用性。

1 AA-CAES 原理及热力学模型

1.1 AA-CAES 原理

AA-CAES 的压缩和膨胀过程一般不能同时进行,供热过程则相对独立,本文考虑充电-供热和发电-供热2种运行模式。AA-CAES 的结构如图1所示,系统利用富余电量压缩空气充电,压缩热由换热器1收集并存储于高温储热罐内,高压空气则存储

收稿日期:2019-04-01;修回日期:2019-06-17

基金项目:国家自然科学基金创新群体研究项目(51621065);
国网安徽省电力有限公司科技项目(521205180021)

Project supported by the Foundation for Innovative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (51621065) and the Science and Technology Project of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. (521205180021)

于储气室中;部分压缩热经换热器2加热高压空气,推动膨胀机对外做功发电;剩余压缩热可通过换热器3对外供热^[9]。

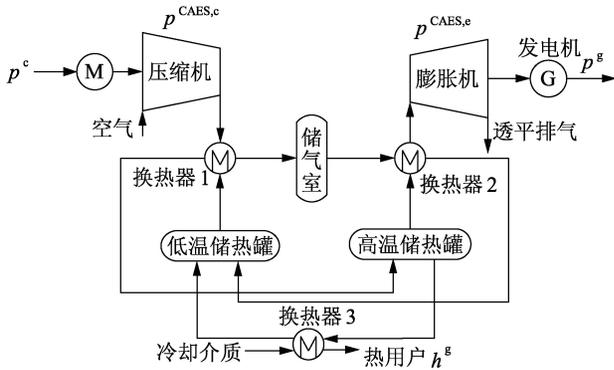


图1 AA-CAES的结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of AA-CAES structure

1.2 AA-CAES的热力学模型

AA-CAES压缩和膨胀过程的热力学分析基于以下假设:①将空气视为理想气体,且其定压比热容视为常数;②储热罐的温度恒定;③储气室采用定容恒温模型;④换热过程保持空气和蓄热介质的热容率相同;⑤单个调度时段内充(放)电功率和供热功率保持恒定;⑥运行过程中不发生漏气和热量损失。

(1)压缩过程。

压缩机的压缩功率和空气质量流量的关系为^[13,15]:

$$p_t^{CAES,c} = \frac{\kappa}{\kappa-1} R_g \dot{m}_t^{c,a} \sum_{i=1}^{N^c} (T_i^{c,out} - T_i^{c,in}) \quad (1)$$

其中, $p_t^{CAES,c}$ 为时段 t 压缩机的压缩功率; κ 为空气的绝热指数; R_g 为理想气体常数; $\dot{m}_t^{c,a}$ 为时段 t 压缩侧的空气质量流量; $T_i^{c,in}$ 、 $T_i^{c,out}$ 分别为第 i 级压缩机入口、出口的空气温度; N^c 为压缩机级数。

第 i 级压缩机出口空气温度与入口空气温度的关系为:

$$T_i^{c,out} = T_i^{c,in} \left[\frac{(\beta_i^c)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1}{\eta_i^c} + 1 \right] \quad (2)$$

其中, β_i^c 、 η_i^c 分别为第 i 级压缩机的压缩比、绝热效率。

根据换热器换热效率的表达式^[7],由温度混合公式得到各级压缩侧换热器出口蓄热介质的汇合温度为:

$$\sum_{i=1}^{N^c} T_i^{HXc,mout} = (N^c - \varepsilon_{N^c}^c) T^{TESL} + \varepsilon_{N^c}^c T_{N^c}^{c,out} + \sum_{i=1}^{N^c-1} (T_i^{c,out} - T_{i+1}^{c,in}) \quad (3)$$

其中, $T_i^{HXc,mout}$ 为第 i 级压缩侧换热器出口蓄热介质的温度; $\varepsilon_{N^c}^c$ 为末级压缩机换热器的换热效率; T^{TESL}

为低温储热罐的温度。

时段 t 压缩侧换热器的吸热功率为:

$$h_t^c = \dot{m}_t^{c,a} c_p^a \left(\sum_{i=1}^{N^c} T_i^{HXc,mout} - N^c T^{TESL} \right) \quad (4)$$

其中, c_p^a 为空气定压比热容。

(2)膨胀过程。

膨胀功率和膨胀机入口的空气质量流量关系为:

$$p_t^{CAES,e} = \frac{\kappa}{\kappa-1} R_g \dot{m}_t^{e,a} \sum_{i=1}^{N^e} (T_i^{e,in} - T_i^{e,out}) \quad (5)$$

其中, $p_t^{CAES,e}$ 为时段 t 的膨胀功率; $\dot{m}_t^{e,a}$ 为时段 t 透平侧的空气质量流量; $T_i^{e,in}$ 、 $T_i^{e,out}$ 分别为第 i 级膨胀机入口、出口的空气温度; N^e 为膨胀机级数。

第 i 级膨胀机出口空气温度与入口空气温度的关系为:

$$T_i^{e,out} = T_i^{e,in} \left\{ \eta_i^e \left[(\beta_i^e)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} - 1 \right] + 1 \right\} \quad (6)$$

其中, β_i^e 、 η_i^e 分别为第 i 级膨胀机的膨胀比、绝热效率。

透平侧各级换热器出口蓄热介质的汇合温度为:

$$\sum_{i=1}^{N^e} T_i^{HXe,mout} = N^e T^{TESH} + T^{GS} + \sum_{i=1}^{N^e-1} T_i^{e,out} - \sum_{i=1}^{N^e} T_i^{e,in} \quad (7)$$

其中, T^{TESH} 为高温储热罐的温度; T^{GS} 为储气室的温度; $T_i^{HXe,mout}$ 为透平侧第 i 级换热器出口蓄热介质的温度。

时段 t 透平侧换热器的放热功率为:

$$h_t^e = \dot{m}_t^{e,a} c_p^a \left(N^e T^{TESH} - \sum_{i=1}^{N^e} T_i^{HXe,mout} \right) \quad (8)$$

2 AA-CAES运行可行域确定方法

热电联产(CHP)机组的电热特性建模仅考虑了发电功率和供热功率约束^[16-17],借鉴CHP机组运行可行域的概念,AA-CAES的运行可行域由系统的电、热功率约束和储能状态约束确定,其仅与自身性能参数和系统上一时段的储能状态有关。

2.1 AA-CAES热电联供模式可行域分析的关键系数

本文所提AA-CAES运行可行域分析方法需要用到4个重要系数,本节给出它们的定义。

定义压缩侧换热器的吸热功率与充电功率之比为 c_1 ,由式(1)和式(4)可得:

$$c_1 = \frac{h_t^c}{p_t^c} = \eta_c \frac{\varepsilon_{N^c}^c T_{N^c}^{c,out} - \varepsilon_{N^c}^c T^{TESL} + \sum_{i=1}^{N^c-1} (T_i^{c,out} - T_{i+1}^{c,in})}{\sum_{i=1}^{N^c} (T_i^{c,out} - T_i^{c,in})} \quad (9)$$

其中, p_t^c 为时段 t 的充电功率; η_c 为电动机的效率。

定义透平侧换热器的放热功率与发电功率之比

为 c_2 , 由式(5)和式(8)可得:

$$c_2 = \frac{h_t^e}{P_t^g} = \frac{\sum_{i=1}^{N^e} T_i^{e,in} - T^{GS} - \sum_{i=1}^{N^e-1} T_i^{e,out}}{\eta_g \sum_{i=1}^{N^e} (T_i^{e,in} - T_i^{e,out})} \quad (10)$$

其中, P_t^g 为时段 t 的发电功率; η_g 为发电机的效率。

定义压缩过程的进气流量与压缩功率之比为 α_1 , 膨胀过程的进气流量与膨胀功率之比为 α_2 , α_1 、 α_2 可分别由式(1)和式(5)确定。

2.2 AA-CAES 热电联供运行约束

AA-CAES 的双荷电状态 SOC(State Of Charge) 模型^[18]可以反映充放电过程中储气室气压和储热罐储热量的动态变化过程, 本文采用双 SOC 模型刻画 AA-CAES 的储能状态。

时段 t 末高温储热罐的储热量为:

$$H_t^{TES} = \begin{cases} H_{t-1}^{TES} + (c_1 p_t^c - h_t^e) \Delta t & \text{充电-供热模式} \\ H_{t-1}^{TES} - (c_2 p_t^g + h_t^e) \Delta t & \text{发电-供热模式} \end{cases} \quad (11)$$

其中, H_t^{TES} 为时段 t 末高温储热罐的储热量; h_t^e 为时段 t 内的供热功率; Δt 为单位调度时段时长。

时段 t 末储气室的气压为:

$$P_t^{GS} = \begin{cases} P_{t-1}^{GS} + \frac{R_g}{V^{GS}} T^{GS} \alpha_1 \eta_c P_t^c \Delta t & \text{充电-供热模式} \\ P_{t-1}^{GS} - \frac{R_g}{V^{GS}} T^{GS} \alpha_2 P_t^g \Delta t & \text{发电-供热模式} \end{cases} \quad (12)$$

其中, P_t^{GS} 为时段 t 末储气室的气压; V^{GS} 为储气室的体积。

为了保证 AA-CAES 安全、高效地运行, 除了需满足电、热功率约束外, 储气室的气压和储热罐的储热量必须保持在一定的范围内^[13,15]。充电-供热模式和发电-供热模式下的运行约束如下所示。

(1) 充电-供热模式下的运行约束。

充电-供热运行模式需要满足供热侧换热器的最大放热功率限制(式(13))和高温储热罐的储热量上下限约束(式(14))。

$$h_t^e \leq h^{\text{hout,max}} \quad (13)$$

$$\underline{H} \leq H_t^{TES} \leq \bar{H} \quad (14)$$

其中, $h^{\text{hout,max}}$ 为供热侧换热器的最大放热功率; \underline{H} 、 \bar{H} 分别为高温储热罐储热量的下限、上限。AA-CAES 的充电功率上限 $p_t^{c,\max}$ 由压缩侧换热器的最大吸热功率 $h^{\text{cin,max}}$ 、压缩机压缩功率上限 $p^{\text{CAESc,max}}$ 和储气室气压上限确定, 即 p_t^c 满足:

$$p_t^c \leq p_t^{c,\max} = \min \{ h^{\text{cin,max}} / c_1, p^{\text{CAESc,max}} / \eta_c, p_t^{\bar{p}} \} \quad (15)$$

其中, $p_t^{\bar{p}}$ 为储气室气压上限确定的充电功率上限, 可由式(12)确定。

(2) 发电-供热模式下的运行约束。

发电-供热模式下的运行约束包括供热侧换热

器最大放热功率限制(式(13))、高温储热罐储热量上下限约束(式(14)), 以及由透平侧换热器放热功率上限 $h^{\text{out,max}}$ 、膨胀机膨胀功率上限 $p^{\text{CAESe,max}}$ 、储气室气压下限确定的发电功率上限约束, 即式(16)。

$$p_t^g \leq p_t^{g,\max} = \min \{ h^{\text{out,max}} / c_2, \eta_g p^{\text{CAESe,max}}, p_t^{\underline{p}} \} \quad (16)$$

其中, $p_t^{\underline{p}}$ 为储气室气压下限确定的发电功率上限。

2.3 运行可行域刻画

通过讨论不同运行模式下的冗余约束, 确定该时段运行可行域边界和极点坐标的解析表达式, 以此绘制 AA-CAES 的运行可行域。下文分别给出充电-供热和发电-供热模式下的运行可行域刻画示例。

(1) 充电-供热模式下的运行可行域。

假设时段 t 供热侧换热器的最大放热功率大于由储热量下限确定的最大供热功率, 且当按供热侧换热器最大放热功率供热所消耗的热量与按充电功率上限充电所存储的热量之差大于上一时段末剩余的压缩热量时, 运行可行域的边界由充电功率上限和储热量下限确定, 如图 2 所示, 图中极点 A、B、C、O 的坐标分别为 $(0, (H_{t-1}^{TES} - \underline{H}) / \Delta t)$ 、 $(p_t^{c,\max}, (H_{t-1}^{TES} - \underline{H}) / \Delta t + c_1 p_t^{c,\max})$ 、 $(p_t^{c,\max}, 0)$ 、 $(0, 0)$ 。

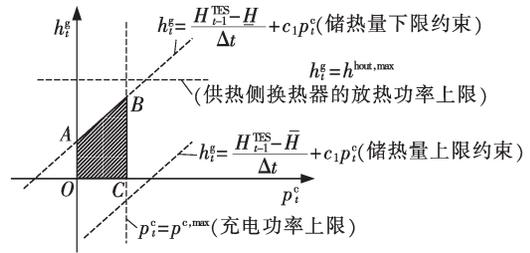


图 2 充电-供热模式的运行可行域
Fig.2 Operation feasible region of charging-heating mode

(2) 发电-供热模式下的运行可行域。

假设时段 t 内按供热侧换热器的最大放热功率对外供热或按发电功率上限发电所消耗的热量均小于上一时段末储热罐的剩余压缩热量, 但两者之和大于剩余压缩热量, 则运行可行域的边界由发电功率上限、供热侧换热器的最大放热功率及储热罐储热量下限确定, 见图 3, 图中极点 A、B、C、D、O 的坐标分别为 $(0, h^{\text{hout,max}})$ 、 $((H_{t-1}^{TES} - \underline{H}) / \Delta t - h^{\text{hout,max}} / c_2, h^{\text{hout,max}})$ 、 $(p_t^{g,\max}, (H_{t-1}^{TES} - \underline{H}) / \Delta t - c_2 p_t^{g,\max})$ 、 $(p_t^{g,\max}, 0)$ 、 $(0, 0)$ 。

3 AA-CAES 运行可行域的特点及应用

3.1 运行可行域的特点

(1) 当采用固定效率模型时, 所有运行约束为线性约束, AA-CAES 的运行可行域为凸多边形, 关键系数 c_1 、 c_2 分别对应充电-供热和发电-供热这 2 种运行状态下由储热量上下限确定的可行域边界的斜线

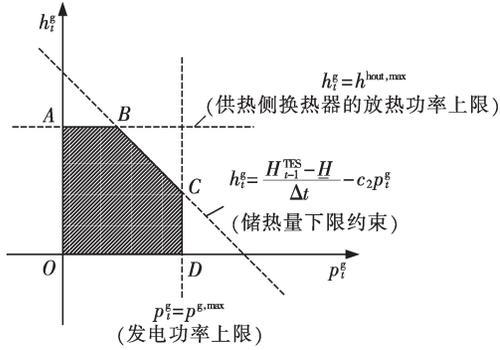


图3 发电-供热模式的运行可行域

Fig.3 Operation feasible region of generating-heating mode

斜率的绝对值。

(2) 由于储气室的气压与储热罐的储热量状态随运行过程而变化, AA-CAES 的运行可行域是时变的, 由当前时段的运行可行域和实际运行点可确定下一时段的运行可行域。

(3) 运行可行域的形状反映了 AA-CAES 运行的灵活性, 可行域的形状越接近矩形, 则 AA-CAES 的运行灵活性越好。

(4) 运行点与运行可行域边界的相对距离反映了 AA-CAES 的调节裕量。如果运行点位于可行域边界, 则该边界对应的约束为该时段 AA-CAES 的供能限制因素; 如果实际运行点常处于同一可行域边界, 则该边界对应的系统参数设置可能不合理, 以此指导 AA-CAES 系统的参数优化。

3.2 考虑供热比变化的 AA-CAES 运行可行域

将 AA-CAES 的供热比定义为一个运行周期内系统对外供热量占总压缩储存热量的比例, 供热比反映了 AA-CAES 压缩热量的分配方式。假设在一个运行周期的始、末, 储气室的气压和储热罐的储热量保持不变, 则额定运行参数下 AA-CAES 的供热比为:

$$\Gamma = 1 - \frac{c_2 \alpha_1 \eta_c \eta_g}{c_1 \alpha_2} \quad (17)$$

调节透平进气温度可以改变系统的供热比, 当透平进气温度增加时, 产生相同电量需消耗更多的压缩热, 系统的供热比将减小。为了准确地刻画供热比改变情况下 AA-CAES 的运行可行域, 需要对关键系数 c_2 、 α_2 进行修正。设透平进气温度的额定值与实际值的比值为 χ , 额定运行参数下透平侧的关键系数取值为 c_2 和 α_2 , 修正后的关键系数仍为常数, 其表达式分别为:

$$c_2' = \left[1 - (\chi - 1) T^{\text{GS}} / \left(\sum_{i=1}^{N^e} T_i^{\text{e, in}} - T^{\text{GS}} - \sum_{i=2}^{N^e} T_{i-1}^{\text{e, out}} \right) \right] c_2 \quad (18)$$

$$\alpha_2' = \chi \alpha_2 \quad (19)$$

3.3 计及宽工况影响的 AA-CAES 运行可行域

在 AA-CAES 和风电的协同优化等场景中, AA-CAES 往往处于宽工况运行, 此时采用固定效率模型可能使分析结果趋于乐观^[12, 18]。由于描述运行可行域的 4 个关键系数与压缩机和膨胀机的性能参数有关, 考虑宽工况时的运行可行域可能是非凸的。为了准确地刻画计及宽工况影响的 AA-CAES 的运行可行域, 首先基于系统的仿真模型或厂家提供的实验数据进行数值拟合, 得到宽工况下的压缩比、膨胀比和绝热效率与实际压缩功率、膨胀功率的关系, 即:

$$\begin{cases} \beta^c = f_1(p^{\text{CAES}, c}), & \beta^e = f_2(p^{\text{CAES}, e}) \\ \eta^c = f_3(p^{\text{CAES}, c}), & \eta^e = f_4(p^{\text{CAES}, e}) \end{cases} \quad (20)$$

根据式(20)得到 4 个关键系数的解析表达式, 再由前述方法即可得到计及宽工况影响的运行可行域。

3.4 运行可行域在实时调度中的应用

实时调度要求 AA-CAES 在满足运行约束的同时尽可能地跟踪电功率、热功率调度指令。可视化方法可实时显示调度指令与当前时段运行可行域的相对位置, 如果调度指令超过 AA-CAES 的供能能力和调节范围, 可以通过调节透平进气温度等运行参数改变运行可行域的形状, 使调度指令点位于可行域边界以跟踪调度指令。假设额定透平进气温度下的运行可行域如图 4 所示, 该时段系统的电功率、热功率调度指令分别为 p_t^{ref} 和 h_t^{ref} , 为了使实际运行点刚好位于由储热量下限确定的可行域边界上, 系数 c_2 应修正为:

$$c_2'' = \frac{(H_{t-1}^{\text{TES}} - H) / \Delta t - h_t^{\text{ref}}}{p_t^{\text{ref}}} \quad (21)$$

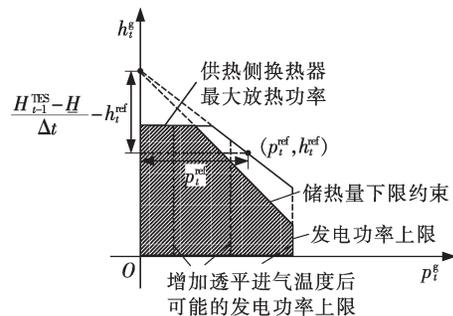


图4 额定透平进气温度的运行可行域

Fig.4 Operation feasible region under rated inlet temperature of turbine

联立式(5)、式(6)和式(11)可以确定透平进气温度。需要注意的是, 由于关键系数 α_2 以及由储气室气压下限确定的发电功率上限 p_t^e 也会随着透平进气温度的变化而发生改变, 调度指令点可能仍处于调整运行参数后的运行可行域以外。另外, 该方法只适用于发电模式下储热量下限或储气室气压下

限越界的情况。

如果超出运行参数的调节范围,AA-CAES可根据系统的要求按以热定电或以电定热方式运行,2种方式下AA-CAES实际运行点的确定方法如图5所示。分析调度指令越限情况,可以得到以热定电方式下AA-CAES跟踪调度指令的运行策略,如图6所示。以电定热方式的运行策略与之类似,在此不再赘述。

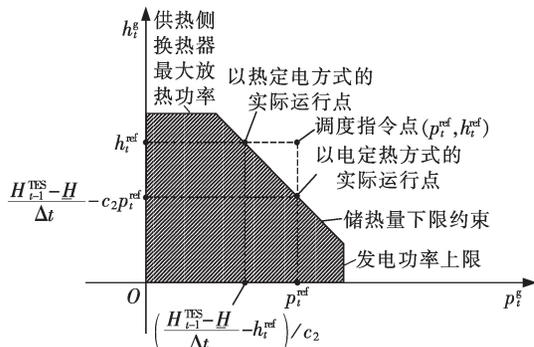


图5 实际运行点的确定方法

Fig.5 Determination method of actual operation point

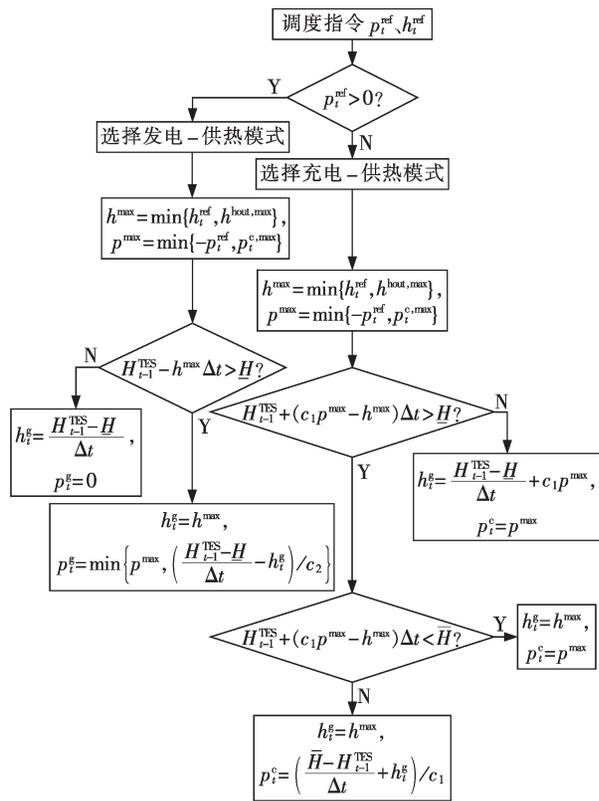


图6 以热定电方式的运行策略

Fig.6 Operation strategy of ordering power by heat mode

4 仿真分析

4.1 系统参数

以某区域电-热综合能源系统为例,该系统包含一座20 MW的风电场;一台背压式CHP机组,容量

为40 MW,热电比为1.2;一座12 MW / 60 MW·h的AA-CAES电站,AA-CAES采用2级压缩和2级膨胀,具体设计参数如附录中表A1所示。系统供暖期典型日负荷和风电出力曲线如附录中图A1所示。仿真中考虑CHP机组按以热定电方式运行,并以系统电功率、热功率缺额作为AA-CAES的功率调度指令,AA-CAES采用以热定电运行策略,本文规定发电功率为正。

4.2 仿真结果及讨论

考虑系统供暖期典型日电、热负荷峰值分别为48 MW和46 MW,图7给出了AA-CAES的实际运行曲线,并标注了各时段制约调度指令跟踪效果的因素(调度周期为1 d,将其分为24个时段,单位时段时长1 h),图8直观地展示了AA-CAES运行可行域的变化趋势以及各时段的运行情况和调节裕量。由图可以看出,AA-CAES的实际运行点均位于该时段运行可行域以内(或边界上),而且AA-CAES可以完全跟踪热功率调度指令(图7中AA-CAES的实际供热功率与热功率调度指令完全重合),从而验证了以热定电运行策略的可行性。由于全部时段的发电-供热运行可行域及大部分时段的充电-供热运行可行域为矩形,所以系统的运行灵活性较好。由图还可以看出,在时段1—4、23、24,实际运行点位于由充电功率上限确定的边界上;在时段5—11,储热量上限限制了AA-CAES的充电功率,由此表明,为了

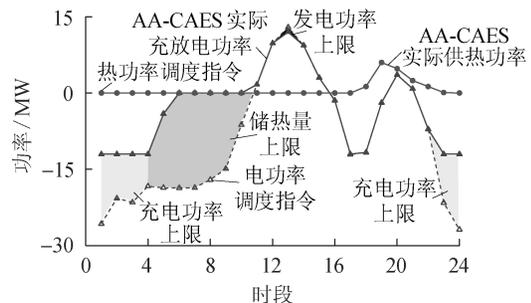


图7 AA-CAES调度指令与实际运行曲线

Fig.7 Scheduling instruction and actual operation curves of AA-CAES

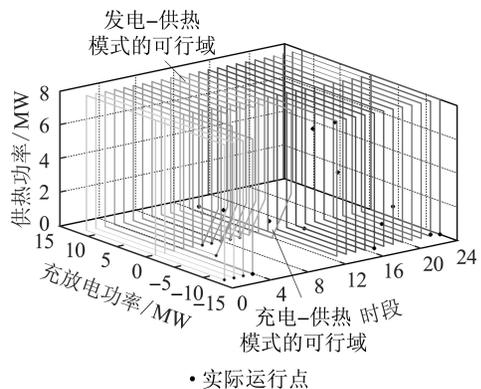


图8 AA-CAES的运行可行域

Fig.8 Operation feasible region of AA-CAES

消纳更多的富余电量、更好地跟踪调度指令,应增加AA-CAES的容量和额定压缩功率,仅靠改变运行方式提升调节能力的作用有限。

下面考虑系统的热负荷、电负荷比例对AA-CAES运行可行域变化趋势的影响。场景1和场景2中设置系统的热负荷峰值均为46 MW,电负荷峰值分别为36 MW和58 MW,2种场景下的仿真结果如图9所示。

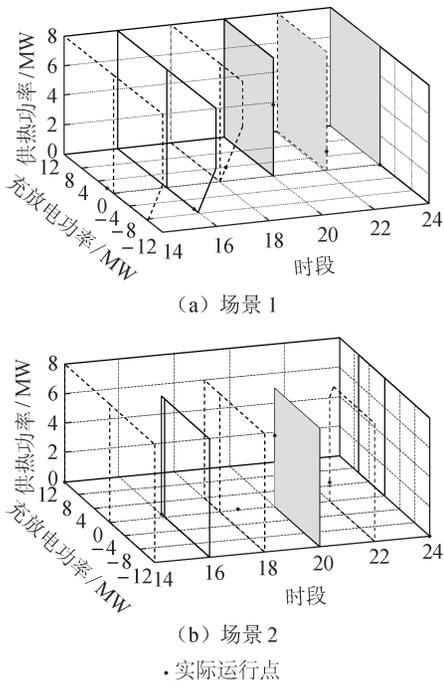


图9 不同热、电负荷比例下AA-CAES的运行可行域
Fig.9 Operation feasible region of AA-CAES under different proportions of heat and power load

当系统电负荷较小时,如图9(a)所示,随着充电过程的进行,在时段20—24储气室的气压将达到上限,此时充电-供热模式的可行域为一条经过原点的竖直线,AA-CAES完全丧失充电能力。当系统电负荷较大时,如图9(b)所示,AA-CAES需向系统提供更多的电量,随着发电过程的进行,在时段20储气室的气压首先达到下限,AA-CAES完全丧失发电能力。

调节透平进气温度等运行参数可改善运行可行域的形状,增大AA-CAES的调节范围,提升调度指令的跟踪能力,下面以场景2为例分析运行参数的变化对AA-CAES运行可行域的影响,仿真结果如图10所示,可以看到全时段下AA-CAES实际供热功率曲线与热功率调度指令完全重合;时段19的实际发电功率与调度指令相差0.29 MW,该时段的发电-供热模式运行可行域边界如图11中的实线所示,该时段调度指令跟踪效果的限制因素为储气室的气压下限。

为了使调度指令点恰好位于运行可行域边界,

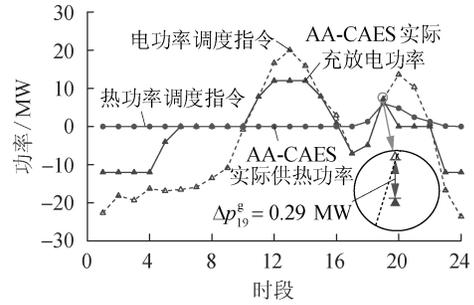


图10 场景2下AA-CAES调度指令与实际运行曲线
Fig.10 Scheduling instruction and actual operation curves of AA-CAES under Case 2

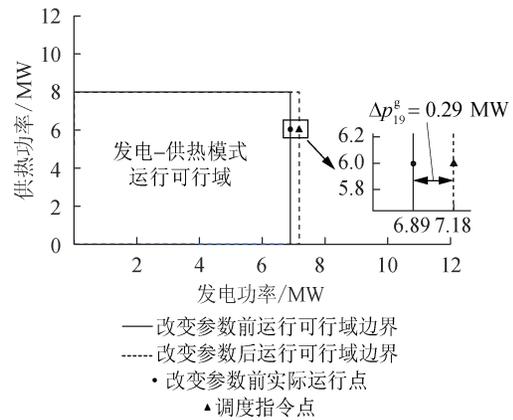


图11 改变参数前、后AA-CAES的运行可行域
Fig.11 Operation feasible region of AA-CAES before and after changing parameter

应增加由储气室气压下限确定的发电功率上限 p_t^g ,使储气室气压下限约束确定的可行域边界向右平移,可通过提高透平进气温度以及减小系数 α_2 实现。经计算,取 $\chi=0.96$,此时发电-供热模式的运行可行域如图11中的虚线所示,从而增大了AA-CAES的出力区间和调节范围,使其可以完全跟踪该时段的调度指令。

5 结论

本文考虑AA-CAES电、热功率约束和储能状态约束,提出了AA-CAES运行可行域的确定方法,为理解AA-CAES热、电之间的复杂耦合和相互制约关系,评估系统的运行灵活性、供能能力和调节裕量提供了一种可视化分析工具。在此基础上分析了运行可行域的形状、特点和影响因素。该方法可拓展到考虑宽工况、改变供热比等情况下AA-CAES运行可行域的确定。运行可行域分析方法可广泛应用于含AA-CAES综合能源系统的容量规划、实时调度和调度可视化等诸多场景,对AA-CAES的参数设计、结构改进和运行优化具有指导意义。算例验证了AA-CAES解决供暖期风电消纳问题的可行性,体现了可行域分析方法在评估系统运行灵活性、提升调度指

令跟踪效果等方面的实用价值。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 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,2018,42(4):1-10,46.
AI Qian,HAO Ran. Key technologies and challenges for multi-energy complementarity and optimization of integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(4):1-10,46.
- [2] 赵曰浩,彭克,徐丙垠,等. 综合能源系统分层分布式协调控制方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):253-259.
ZHAO Yuehao,PENG Ke,XU Bingyin, et al. Hierarchical and distributed coordination control of integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(6):253-259.
- [3] 熊文,刘育权,苏万煌,等. 考虑多能互补的区域综合能源系统多种储能优化配置[J]. 电力自动化设备,2019,39(1):118-126.
XIONG Wen,LIU Yuquan,SU Wanhuang, et al. Optimal configuration of multi-energy storage in regional integrated energy system considering multi-energy complementation[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(1):118-126.
- [4] BUDT M,WOLF D,SPAN R, et al. A review on compressed air energy storage:basic principles,past milestones and recent developments[J]. Applied Energy,2016,170:250-268.
- [5] VENKATARAMANI G,PARANKUSAM P,RAMALINGAM V, et al. A review on compressed air energy storage—a pathway for smart grid and polygeneration[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2016,62:895-907.
- [6] LIU J L,WANG J H. A comparative research of two adiabatic compressed air energy storage systems[J]. Energy Conversion and Management,2016,108:566-578.
- [7] 张远,杨科,李雪梅,等. 基于先进绝热压缩空气储能的冷热电联产系统[J]. 工程热物理学报,2013,34(11):1991-1996.
ZHANG Yuan,YANG Ke,LI Xuemei, et al. A Combined Cooling, Heating and Power(CCHP) system based on Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage(AA-CAES) technology[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2013,34(11):1991-1996.
- [8] HAN Z H, GUO S C. Investigation of operation strategy of Combined Cooling, Heating and Power(CCHP) system based on advanced adiabatic compressed air energy storage[J]. Energy,2018,160:290-308.
- [9] 薛小代,刘彬卉,汪雨辰,等. 基于压缩空气储能的社区微能源网设计[J]. 中国电机工程学报,2016,36(12):3306-3313.
XUE Xiaodai,LIU Binhui,WANG Yuchen, et al. Micro energy network design for community based on compressed air energy storage[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(12):3306-3313.
- [10] 严毅,张承慧,李珂,等. 含压缩空气储能的冷热电联供微网优化运行策略[J]. 中国电机工程学报,2018,38(23):6924-6936,7126.
YAN Yi,ZHANG Chenghui,LI Ke, et al. The optimal operation strategy for hybrid combined cooling, heating and power microgrid with compressed air energy storage[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(23):6924-6936,7126.
- [11] SAFAEI H, KEITH D W. Compressed air energy storage with waste heat export: an Alberta case study[J]. Energy Conversion and Management,2014,78:114-124.
- [12] NIKOLAKAKIS T, FTHENAKIS V. The value of compressed-air

energy storage for enhancing variable-renewable-energy integration: the case of Ireland[J]. Energy Technology,2017,5(11):2026-2038.

- [13] LI R, CHEN L J, YUAN T J, et al. Optimal dispatch of zero-carbon-emission micro energy internet integrated with non-supplementary fired compressed air energy storage system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2016,4(4):566-580.
- [14] 李瑞,陈来军,梅生伟,等. 先进绝热压缩空气储能电站日前电力市场主从博弈竞标策略[J]. 控制理论与应用,2018,35(5):662-667.
LI Rui,CHEN Laijun,MEI Shengwei, et al. Day-ahead strategic bidding for advanced adiabatic compressed air energy storage plant: a Stackelberg game approach[J]. Control Theory & Applications,2018,35(5):662-667.
- [15] 李姚旺,苗世洪,尹斌鑫,等. 考虑先进绝热压缩空气储能电站备用特性的电力系统优化调度策略[J]. 中国电机工程学报,2018,38(18):5392-5404.
LI Yaowang,MIAO Shihong,YIN Binxin, et al. Power system optimal scheduling strategy considering reserve characteristics of advanced adiabatic compressed air energy storage plant[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(18):5392-5404.
- [16] 于婧,孙宏斌,沈欣炜. 考虑储热装置的风电-热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.
- [17] 魏伟,倪颖婷,罗凤章,等. 基于热网互联的电力系统灵活性调度模型[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):164-170.
WEI Wei,NI Yingting,LUO Fengzhang, et al. Power system flexibility dispatch model based on thermal network interconnection[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(6):164-170.
- [18] 李瑞,陈来军,梅生伟,等. 先进绝热压缩空气储能变工况运行特性建模及风储协同分析[J]. 电力系统自动化,2019,43(11):25-33.
LI Rui,CHEN Laijun,MEI Shengwei, et al. Modelling the off-design operation characteristics of advanced adiabatic compressed air energy storage and cooperative analysis of hybrid wind power and energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(11):25-33.

作者简介:



白珈于

白珈于(1996—),女,四川广安人,博士研究生,主要研究方向为压缩空气储能以及综合能源系统等(**E-mail**:bjy18@mails.tsinghua.edu.cn);

薛小代(1983—),男,山东蒙阴人,副研究员,博士,研究方向为压缩空气储能以及智慧微能源网等(**E-mail**:xuexiaodai@tsinghua.edu.cn);

陈来军(1984—),男,湖北天门人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为大规模储能技术、电力系统分析与控制等(**E-mail**:chenlaijun@tsinghua.edu.cn);

梅生伟(1964—),男,河南新野人,教授,博士研究生导师,长江学者,IEEE Fellow,主要研究方向为电力系统控制、灾变防治以及大规模储能技术等(**E-mail**:meishengwei@tsinghua.edu.cn)。

(下转第112页 continued on page 112)

Robustness analysis of electricity-gas-heat integrated energy system based on complex network

PAN Hua¹,XIAO Yuhua¹,LIANG Zuofang²,ZHU Zhaoshun¹,HE Hui¹

(1. School of Economics and Management,Shanghai University of Electric Power,Shanghai 200090,China;

2. State Grid Shandong Electric Power Company Heze Power Supply Company,Heze 274000,China)

Abstract: With the continuous expansion of the integrated energy system network scale and the strengthening of the coupling degree, more stringent requirements are put forward for the stability of its structure and the security of its operation. Therefore, the complex network theory is applied to the static structure and robustness analysis of the integrated energy system. NetworkX is used to build the network topology model of the system and its network characteristic parameters are calculated by G. degree, nx.betweenness centrality(G), nx.average_clustering(G) and other algorithms, based on the analysis of the calculative results, the complex network characteristics such as scale-free and small world of the integrated energy system are studied. Three analysis indexes of network fragmentation degree, connectivity factor and energy efficiency ratio are introduced to simulate seven different attack modes on the system. By observing the curves of the above three indexes of the electricity-gas-heat integrated energy system under different faults, the robustness of the system is comprehensively analyzed and the vulnerable links of the system are identified. The research results provide reference and decision support for building a more reliable network system for large-scale integrated energy system.

Key words: complex network;integrated energy system;small world network;scale-free network;robustness

(上接第85页 continued from page 85)

Operation feasible region analysis of advanced adiabatic compressed air energy storage under thermal-electric co-generation mode

BAI Jiayu¹,XUE Xiaodai¹,CHEN Laijun^{1,2},MEI Shengwei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment,

Department of Electrical Engineering,Tsinghua University,Beijing 100084,China;

2. School of Qidi(TUS) Renewable Energy,Qinghai University,Xining 810036,China)

Abstract: AA-CAES(Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage), one of the large-scale clean energy storage technologies, has the thermal-electric co-generation and co-storage capacity, which can be used as an energy hub to connect to the integrated energy system, so as to improve the operation flexibility of system and promote the consumption of renewable energy. An operation feasible region characterization method is proposed, which can directly reflect the power constraint and energy storage state constraint of AA-CAES, providing a visual tool for understanding the thermoelectric coupling relationship of AA-CAES, analyzing the operation characteristics of thermal-electric co-generation mode, and evaluating the operation flexibility, energy supply ability and adjustable range of the system. On this basis, the shape and characteristics of operation feasible region are studied, the processing method of operation feasible region considering the variation of heating ratio and the influence of wide operating conditions are analyzed, and the application of operation feasible region as an analytical tool in the real-time dispatching is discussed. Taking a regional integrated energy system as an example, the validity and practicability of the proposed operation feasible region analysis method are verified.

Key words: advanced adiabatic compressed air energy storage;thermal-electric co-generation;operation feasible region;integrated energy system;thermoelectric coupling;visualization analysis

附录

表 A1 AA-CAES 的设计参数
Table A1 Design parameters of AA-CAES

系统参数	取值
额定充电功率/MW	12
额定发电功率/MW	12
额定容量/(MW·h)	60
第 1、2 级压缩机压比	8.06、8.06
第 1、2 级膨胀机膨胀比	6.78、6.78
第 1、2 级压缩机绝热效率/%	84、84
第 1、2 级膨胀机绝热效率/%	82、82
第 1、2 级膨胀机进气温度/°C	277、277
第 1、2 级压缩机进气温度/°C	20、47
储气室最低气压/MPa	4.5
储气室最高气压/MPa	6.5
电动机效率/%	95
发电机效率/%	95

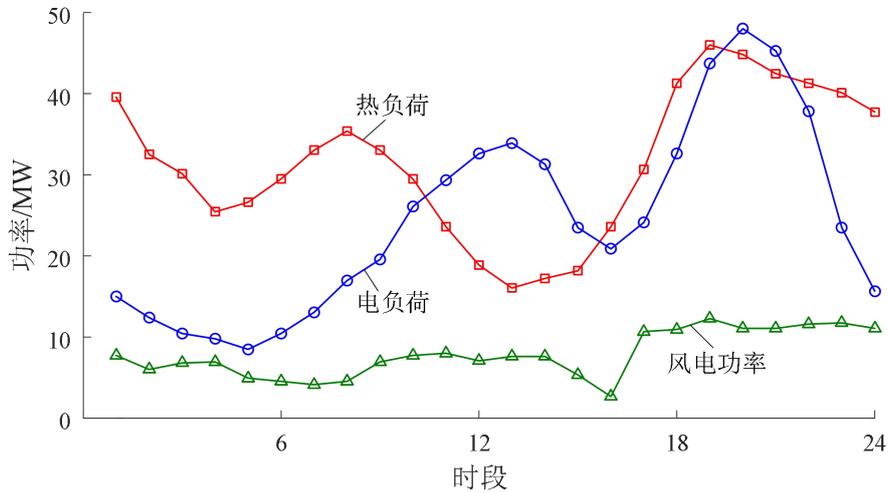


图 A1 供暖期典型日负荷和风电出力曲线

Fig.A1 Typical daily load and wind power output curves in heating period