DOI: 10.19666/j.rlfd.202603034

350 MW 压缩空气储能系统释能阶段动态特性与故障暂态特性研究

赵云龙，李 斌，吴正人，魏 昊，王安琪，李远呈
（华北电力大学（保定）动力工程系，河北 保定 071003）

［摘 要］【目的】本文针对 350 MW 先进绝热压缩空气储能系统发电侧释能过程的动态特性及并网暂态特性，探究系统在复杂工况与故障扰动下的动态响应规律。【方法】基于 Python 平台构建了包括储气罐、阀门、膨胀机、加热器及四阶同步发电机的动态模型。在此基础上，设计多种运行工况，开展了系统的动态特性与热电耦合多故障暂态特性分析。【结果】仿真结果表明，初始储气压力和控制方式会显著影响系统的动态响应与输出功率，储气压力越高，系统在扰动后的功率提升能力越强，调节过程也相对更平稳。故障分析结果显示：热侧故障会使阀门开度持续增大，调节裕度减小；电侧短路故障则主要影响机端电压和输出功率的恢复过程，且不同故障类型造成的扰动程度不同；热侧故障叠加电侧短路故障时，系统的恢复过程更加复杂，控制压力进一步增大。【结论】本文所建的 AA-CAES 发电侧动态模型，实现了多种工况的动态仿真和故障暂态分析，可为 AA-CAES 释能发电侧动态分析及故障机理研究提供参考。

［关 键 词］先进绝热压缩空气储能；释能发电侧；动态建模；四阶同步发电机；热电耦合故障

［引用本文格式］（本段作者勿动）作者姓名. 中文标题[J]. 热力发电, 年, 卷(期): 起始页码-终止页码. 作者姓名. 英文标题[J]. Thermal Power Generation, 年, 卷(期): 起始页码-终止页码.

Study on dynamic and fault transient characteristics of the discharge stage of a 350 MW compressed air energy storage system

Zhao Yunlong, Li Bin, Wu Zhengren, Wei Hao, Wang Anqi, Li Yuancheng
(Department of Power Engineering, North China Electric Power University (Baoding), Baoding 071003, China)

Abstract: [Objective] To address the unclear dynamic mechanisms and the lack of research on thermo-electric coupling fault characteristics during the discharge and power generation process of a 350 MW Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage (AA-CAES) system, this paper constructs a dynamic model for the discharge power generation side. This model can reflect the internal dynamic behaviors of key components and grid-connection transient characteristics, aiming to provide a theoretical basis for the dynamic performance evaluation and fault mechanism exploration of large-scale AA-CAES systems. [Methods] A dynamic model encompassing air storage tanks, control valves, multi-stage expanders, heaters, and a fourth-order synchronous generator was built based on the Python platform. On this basis, dynamic simulation research was conducted under various operating conditions and disturbance scenarios. The analysis includes the impact of different initial air storage pressures and control methods on the system's dynamic performance, as well as the transient characteristics under heat-side faults, electrical-side short-circuit faults, and thermo-electric coupled complex faults. Through comparative simulations, the response characteristics of system variables such as output power, terminal voltage, valve opening, and control pressure were investigated to reveal the influence patterns of

收 稿 日 期：2026-03-13 修 回 日 期：2026-04-23 接 受 日 期：2026-04-26 网络首发日期：XXXX-XX-XX
基 金 项 目：国家自然科学基金青年科学基金项目（52206010）
Supported by: National Natural Science Foundation for Young Scientists of China(52206010)
第一作者简介：赵云龙（2001），男，硕士研究生，主要研究方向为压缩空气储能系统动态特性，2316443159@qq.com。
通信作者简介：李斌（1969），男，副教授，主要研究方向为能量转换过程仿真与控制优化，binli_871@163.com。

operating conditions and fault combinations on the stability and recovery capability of the power generation side. [Results] The simulation results indicate that the initial air storage pressure and control methods significantly affect the system's dynamic response and output power. A higher air storage pressure leads to a stronger power increase capability after a disturbance and a relatively smoother regulation process. The fault analysis results show that heat-side faults cause the valve opening to continuously increase, reducing the regulation margin. Electrical-side short-circuit faults mainly affect the recovery process of terminal voltage and output power, and different fault types cause varying degrees of disturbance. When a heat-side fault is superimposed on a short-circuit fault, the system's recovery process becomes more complex, and the control pressure further increases. [Conclusions] The dynamic model of the power generation side constructed in this paper can effectively reflect the transient response characteristics during the discharge power generation process and under grid-connection disturbances. It enables dynamic simulation and transient analysis under multi-operating conditions and multi-fault scenarios, revealing the influence patterns of initial air storage pressure, control strategies, and thermo-electric coupled faults on system performance. This study can provide a valuable reference for the dynamic analysis, control optimization, and fault mechanism research of the AA-CAES discharge power generation side, while also providing technical support for the safe and stable operation and future engineering applications of large-scale AA-CAES power stations.

Key words: advanced adiabatic compressed air energy storage; discharge power generation side; dynamic modeling; fourth-order synchronous generator; thermo-electrical coupled faults

在“双碳”目标与新能源高比例接入的背景下，电力系统对大规模、长时储能的需求持续增长，储能不仅能够削峰填谷，还需要提供调频、备用与电压支撑等辅助服务[1]。抽水蓄能电站的选址受地理条件制约，而压缩空气储能（CAES）具有选址相对灵活、寿命长及规模潜力大等优势，受到广泛的关注[2-4]。。为进一步提升系统效率并减少化石燃料依赖，先进绝热压缩空气储能（advanced adiabatic CAES，AA-CAES）提出在压缩阶段回收压缩热并通过蓄热系统存储，在膨胀发电阶段释放蓄热实现“近零燃料补热”的热-机-电闭环过程。近年来，我国先进绝热压缩空气储能技术快速走向工程化应用，多项示范工程相继建成投运[5-8]。

目前，学术界对 AA-CAES 的研究多集中于热力学性能评价、系统参数优化以及稳态特性分析。覃子珍[9]建立了基于 EBSILON 的稳态模型，系统分析不同运行条件对系统效率的影响，为系统设计与方案评估提供了依据。洪杨[10]建立了 AA-CAES 系统的热力学-经济性耦合模型，通过对关键运行参数的调整提升了系统整体效率与经济性。实际运行中，大规模压缩空气储能系统的工况随电网负荷需求、电压和频率波动等不断变化，特别是在发电过程（释能阶段），CAES 的发电功率、频率、电压等参数需要与电网需求动态匹配，运行状态不再是单一稳态点，而是随时间不断变化的动态过程。稳态模型难以描述功率快速调整、压力变化以及并网暂态等关键现象。因此，需要建立动态模型来分析其动态特性与暂态特性。

针对 CAES/AA-CAES 系统动态特性与暂态过程的仿真研究，国内外多依托 MATLAB/Simulink[11-13]等通用平台或 APROS[14,15]、Modelica/Dymola[16,17]等专业建模软件构建系统级或释能阶段动态模型。陈辉等[11]在 MATLAB/Simulink 上建立了压缩空气储能释能过程的动态仿真模型。易聪[12]在 MATLAB/Simulink 平台上基于集总参数法对压缩机、换热器等关键部件进行建模并搭建了 500 kW AA-CAES 仿真系统。李诚[13]在 MATLAB/Simulink 上搭建了兆瓦级 CAES 整体模型，分析了压缩储能与膨胀释能过程的运行与热力学特性。冯庭勇[14]基于 APROS 仿真平台建立 10 MW 级 AA-CAES 系统模型、配电网与并网模型。现有方法在热力过程分析、电力系统并网仿真以及控制策略研究方面已取得较多成果，但仍存在两方面不足：一是不同专业模型往往分散在不同平台中，热力系统动态、发电机机电暂态与短路故障计算的耦合实现较为不便；二是商业软件模型封装程度较高，模型细节和实现过程不易公开，不利于方法复现和后续扩展。基于上述考虑，本文基于 Python 平台开发了一套面向 AA-CAES 发电侧的动态仿真程序，与现有方法相比，具有以下优势：

1）开放性较强，系统方程、控制逻辑及故障注入方式可完整公开，便于复现和二次开发；

2）跨专业耦合灵活，能够在同一框架内实现各种模型的统一建模；

3）模块化扩展方便，各子模型相互独立，便于后续拓展模型、控制策略优化；

4）适用于多工况批量仿真，便于开展不同初始压力、控制模式及故障类型下的程序化分析。

压缩空气储能系统的运行过程可分为压缩储能阶段和释能发电阶段。两阶段在系统动态响应特性方面存在明显差异。其中释能阶段的热力过程与电气过程耦合紧密，是分析系统发电动态特性及并网故障暂态特性的关键运行阶段。基于此，本文针对 350 MW AA-CAES 系统的释能过程开展研究。在多工况动态特性方面，分别设置功率控制模式下的负荷阶跃扰动和阀门控制模式下的阀门开度阶跃扰动，对输出功率、阀门开度等参数的动态响应进行对比，分析初始压力与控制方式对负荷跟踪性能和输出能力的影响。在故障暂态特性方面，构建了多种典型故障工况，定量分析了机端电压暂降、功率恢复过程等机电暂态响应的差异。

1 AA-CAES 发电系统结构与建模

1.1 AA-CAES 发电系统工作原理与系统结构

AA-CAES 系统的工作原理是利用电力负荷低谷时的富余电能将空气压缩并储存于储气装置中，实现电能到压缩空气势能的转换；当电力负荷高峰时，再将储存的高压空气释放，并通过膨胀机驱动发电机发电，从而实现了能量的跨时段转移。本文研究的 350 MW 压缩空气储能电 站采用多级再热-膨胀的结构，在释能阶段，高压空气经过预热后依次进入多个膨胀级进行膨胀做功，各级之间通过再热器进行补热，以提高膨胀效率和系统输出功率。膨胀过程中驱动膨胀机与发电机联动，实现电能输出。系统的拓扑结构如图 1 所示，系统主要由储气装置、膨胀发电机组及无穷大电网组成。

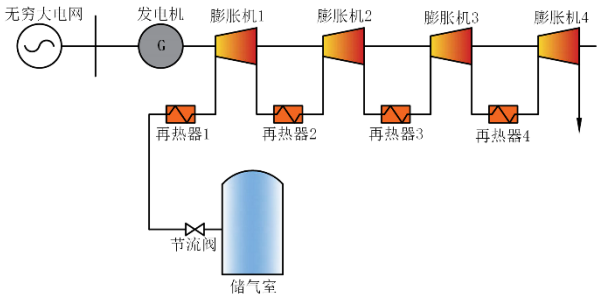


图 1 AA-CAES 发电系统拓扑结构

Fig.1 Topology of the AA-CAES power generation system

1.2 数学模型

1.2.1 系统边界与建模假设

为突出释能发电阶段动态特性及其并网故障暂态特性，本文在建模过程中对压缩空气储能系统的研究范围作适当简化，仅聚焦 AA-CAES 释能侧的动态过程，建立了释能侧的动态模型及可用于多类型故障暂态分析的仿真模型。系统参数在代码中集中管理，包括储气罐、阀门、膨胀机与加热器、四阶同步发电机模型及对称分量故障计算所需序阻抗等。

为保证模型可计算性与工程可用性，作如下假设：

1）储气罐采用集总参数模型，罐内工质视为理想气体，质量变化由进、出流量决定，压力由状态方程更新，经对比 PR 状态方程计算结果，在本文研究的运行压力区间内，空气的压缩因子 Z 约为 0.972~1.014，与理想气体模型误差极小；储气罐能量守恒同时考虑与环境之间的换热以及进、出口气流携带的焓流，释能工况下以流出焓流项为主；考虑到大型储气罐的热惯性极大的问题，本文研究的机电暂态是毫秒级到秒级，而储气罐的热力非线性效应在分钟级才表现明显。因此采用了理想气体假设和线性换热模型；

2）阀门流量采用经验型平方根压差模型，由于本文研究对象为 AA-CAES 系统释能阶段的动态响应，而非阀门内部流场细节，因此阀门模型采用了简化模型；

3）膨胀机为四级串联，级间配置加热器，膨胀过程按等熵关系计算理想出口温度，再由等熵效率修正得到实际做功，效率随负荷比自适应修正；

4）发电机采用四阶同步机暂态模型（转子功角 δ、转速偏差 ω、q 轴暂态电势 $E_{q'}$、d 轴暂态电势 $E_{d'}$），电网简化为无限大母线；故障期间采用对称分量法计算故障点正序电压，并作为 dq 模型输入，实现“电磁暂态-机电暂态”的同框架耦合。

在暂态稳定分析中，四阶发电机模型能够直接输出暂态电势 $E_{q'}$ 与 $E_{d'}$ 的动态响应，用于刻画故障期间发电机内部电磁暂态过程，相比于仅包含功角与转速的二阶发电机模型，四阶模型可同时分析电压暂降、功率恢复与内部电动势变化，从而为不同短路类型下的电磁暂态差异及恢复过程提供更详细的内部参数变化。

本文模型主要包括功率控制模式、阀门控制模式和故障分析模式 3 类运行方式，图 2 给出了控制逻辑框架。

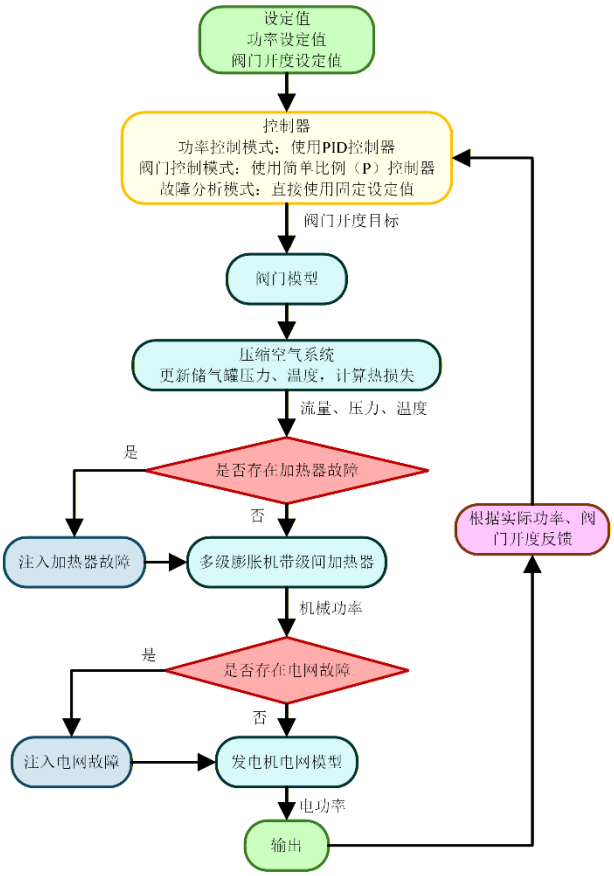


图 2 AA-CAES 发电系统模型的控制逻辑框架
Fig.2 Control logic framework of the AA-CAES power generation system model

1）在功率控制模式下，以系统有功功率指令值为目标输入，将功率偏差作为控制器输入，经调节器计算后输出阀门开度指令，阀门开度变化进一步影响空气质量流量、膨胀机输出机械功率以及发电机电功率，从而构成功率闭环调节。

2）在阀门控制模式下，直接给定阀门开度阶跃信号，系统根据阀门开度变化自行演化，用于分析不同储气初压条件下释能侧功率输出能力及其动态特性。

3）在故障分析模式下，控制器维持原有运行指令不变，在预设时刻叠加电侧短路故障或热侧功率衰减扰动，通过故障网络计算故障点正序电压，并将其耦合输入发电机模型，以分析热—电耦合扰动下的暂态响应特性。

1.2.2 储气罐模型

储气罐容积为 V_{tank}，罐内压力 p_{tank}、温度 T_{tank}。理想气体质量为：

$$m=\frac{p_{\text{tank}}V_{\text{tank}}}{RT_{\text{tank}}} \tag{1}$$

质量守恒（放气为主）：

$$\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t}=-\dot{m}_{valve} \tag{2}$$

离散步进更新后由状态方程得到压力：

$$p_{\text{tank}}=\frac{mRT_{\text{tank}}}{V_{\text{tank}}} \tag{3}$$

储气罐能量守恒方程为：

$$\frac{\mathrm{d}(mu)}{\mathrm{d}t}=\dot{Q}+\dot{m}_{\text{in}}h_{\text{in}}-\dot{m}_{\text{out}}h_{\text{out}} \tag{4}$$

由于本文主要研究释能阶段，储气罐以放气为主，入口质量流量可忽略，因此式(5)可简化为：

$$\frac{\mathrm{d}(mu)}{\mathrm{d}t}=\dot{Q}-\dot{m}_{\text{valve}}h_{\text{out}} \tag{5}$$

结合质量守恒，进一步化简为：

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}=\frac{\dot{Q}-\dot{m}_{\text{valve}}RT}{mc_v} \tag{6}$$

储气罐与环境之间的换热为：

$$\dot{Q}=k_{\text{h}}\left(T-T_{\text{tank}}\right) \tag{7}$$

式中：m 为储气罐内空气质量；$\dot{m}_{\text{valve}}$ 为阀门质量流量；R 为空气气体常数；u 为储气罐内空气比内能；$\dot{Q}$ 为储气罐与环境之间的换热量；$\dot{m}_{\text{out}}$ 为储气罐出口质量流量；h_{out} 为出口气体比焓；c_v 为空气定容比热容；T 为环境温度。

1.2.3 阀门模型

阀门质量流量采用平方根压差形式：

$$\dot{m}_{\text{valve}}=C_{\text{v}}u\sqrt{\max\left(p_{\text{up}}-p_{\text{down}},0\right)} \tag{8}$$

阀门动态响应的一阶惯性环节描述为：

$$\tau_{\text{v}}\frac{\mathrm{d}u_{act}}{\mathrm{d}t}+u_{\text{act}}=u_{\text{tar}} \tag{9}$$

式中：C_{v} 为阀门流量系数，是将阀门流通能力、介质物性、单位换算及模型简化误差综合折算后的等效流量系数，取 0.72；p_{up} 和 p_{down} 分别表示阀门上游压力和下游压力；τ_{v} 为响应时间常数，取 0.5 s（对于大型能源装备中的主调节阀，响应通常明显快于热工过程、慢于纯电磁过程，采用 0.5 s 量级的一阶惯性能够较好反映阀门快速动作的工程特性）；u_{act} 为阀门实际开度；u_{tar} 为目标开度。

1.2.4 级间加热器模型

对给定质量流量 $\dot{m}$ 与入口温度 T_{in}，若以 T_{tar} 为

目标温度，则所需热功率：

$$Q_{\mathrm{req}} = \dot{m} c_p \left(T_{\mathrm{tar}} - T_{\mathrm{in}}\right) \tag{10}$$

实际加热功率受最大值 $Q_{\max}$ 限制，输出温度：

$$T_{\mathrm{out}} = T_{\mathrm{in}} + \frac{\min\left(Q_{\mathrm{req}}, Q_{\max}\right)}{\dot{m} c_p} \tag{11}$$

Q_{req} 为目标加热功率；$Q_{\max}$ 为最大加热功率；T_{in} 和 T_{out} 分别为进口温度、出口温度。

1.2.5 级间膨胀机模型

本系统采用四级串联膨胀机结构，每级膨胀机前均配备级间加热器，用于提高膨胀机入口温度，提升系统效率。对于第 i 级膨胀机（i=1,2,3,4），其具体的热力学过程如下。

理想膨胀过程（等熵膨胀）：

$$T_{\mathrm{out,ideal},i} = T_{\mathrm{in},i} \left(\frac{p_{\mathrm{out},i}}{p_{\mathrm{in},i}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \tag{12}$$

实际膨胀过程（考虑等熵效率）：

$$T_{\mathrm{out},i} = T_{\mathrm{in},i} - \eta_i \left(T_{\mathrm{in},i} - T_{\mathrm{out,ideal},i}\right) \tag{13}$$

为反映膨胀机在部分负荷工况下效率下降、在额定工况附近逐步恢复的特性，本文采用归一化双曲正切函数对第i*i* 级膨胀机等熵效率进行修正：

$$\eta_i = \eta_0 \left[0.8 + 0.2 \frac{\tanh(k\lambda)}{\tanh(k)} \right] \tag{14}$$

该式能够较好反映膨胀机在低负荷下效率偏低、随负荷升高效率逐步恢复并在额定工况下回归额定效率的变化规律。

单级膨胀功：

$$W_i = c_p \left(T_{\mathrm{in},i} - T_{\mathrm{out},i}\right) \tag{15}$$

总机械功率输出：

$$P_{\mathrm{m}} = \sum_{i=1}^{4} \dot{m} W_i \tag{16}$$

式中：$T_{\mathrm{in},i}$、$T_{\mathrm{out},i}$ 为第 i 级膨胀机进出口温度；$p_{\mathrm{in},i}$、$p_{\mathrm{out},i}$ 为第 i 级膨胀机进出口压力；γ 为绝热指数；η_i 为第 i 级膨胀机等熵效率；η_0 为额定等熵效率；λ 为当前负荷比；k 为平滑调节参数；c_p 为定压比热容；$\dot{m}$ 为空气质量流量；W_i 为第 i 级的膨胀功；P_{m} 为原动机机械功率。

1.2.6 同步发电机模型

发电机状态向量：

$$\boldsymbol{x} = \left[\delta, \omega_{\mathrm{pu}}, E_{\mathrm{q}'}, E_{\mathrm{d}'}\right]^{\mathrm{T}} \tag{17}$$

式中：δ 为功角；ω_{pu} 为相对同步转速偏差；$E_{q'}$；$E_{\mathrm{d}'}$ 为暂态电势。pu 表示标幺值，即某物理量与其基准值之比。本文中电压、功率等电气量的标幺值均基于发电机额定电压、额定容量等基准值进行归一化表示。

机电方程：

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega_{\mathrm{b}} \omega_{\mathrm{pu}} \\ \dot{\omega}_{\mathrm{pu}} = \dfrac{P_{\mathrm{m,pu}} - P_{\mathrm{e,pu}} - D\omega_{\mathrm{pu}}}{2H} \end{cases} \tag{18}$$

暂态电势方程：

$$\begin{cases} \dot{E}_{\mathrm{q}'} = \dfrac{E_{\mathrm{fd}} - E_{\mathrm{q}'} - \left(X_{\mathrm{d}} - X_{\mathrm{d}'}\right) I_{\mathrm{d}}}{T_{\mathrm{do}'}} \\ \dot{E}_{\mathrm{d}'} = \dfrac{-E_{\mathrm{d}'} + \left(X_{\mathrm{q}} - X_{\mathrm{q}'}\right) I_{\mathrm{q}}}{T_{\mathrm{qo}'}} \end{cases} \tag{19}$$

式中：ω_{b} 为基准角频率；$P_{\mathrm{m,pu}}$ 为原动机机械功率标幺值；$P_{\mathrm{e,pu}}$ 为发电机电功率标幺值；D；为发电机阻尼系数；H 为发电机惯性常数；I_{d} 和 I_{q} 分别为定子电流的 d 轴和 q 轴分量；X_{d} 和 X_{q} 分别为 d 轴和 q 轴同步电抗标幺值；$X_{\mathrm{d}'}$ 和 $X_{\mathrm{q}'}$ 分别为 d 轴和 q 轴暂态电抗标幺值；$T_{\mathrm{do}'}$ 和 $T_{\mathrm{qo}'}$ 分别为 d 轴和 q 轴励磁绕组开路暂态时间常数。E_{fd} 为励磁输入，在实现中作为外部输入保留。

1.2.7 不同故障类型的模型

1）三相短路（3ph）

三相对称故障仅含正序分量：

$$I_1 = \frac{V_{1,\mathrm{th}}}{Z_{1,\mathrm{th}} + Z_{\mathrm{f}}},\ I_2 = 0, I_0 = 0 \tag{20}$$

2）单相接地短路（1ph）

单相接地故障序网络为正−负−零序串联。

$$I_1 = I_2 = I_0 \tag{21}$$

因此：

$$I_1 = \frac{V_{1,\mathrm{th}}}{Z_{1,\mathrm{th}} + Z_{2,\mathrm{th}} + Z_{0,\mathrm{th}} + 3Z_{\mathrm{f}}} \tag{22}$$

3）两相短路（2ph）

两相短路仅涉及正序与负序，且$I_0=0$，满足：

$$I_2=-I_1 \tag{23}$$

故：

$$I_1=\frac{V_{1,\mathrm{th}}}{Z_{1,\mathrm{th}}+Z_{2,\mathrm{th}}+Z_\mathrm{f}} \tag{24}$$

4）两相接地短路（2ph_g）

两相接地时，负序与零序在故障点并联后再与正序串联。

$$\begin{cases}Z_{0\mathrm{f}}=Z_{0,\mathrm{th}}+3Z_\mathrm{f}\\ Z_\mathrm{par}=Z_{2,\mathrm{th}}\parallel Z_{0\mathrm{f}}=\dfrac{Z_{2,\mathrm{th}}Z_{0\mathrm{f}}}{Z_{2,\mathrm{th}}+Z_{0\mathrm{f}}}\end{cases} \tag{25}$$

则正序电流：

$$I_1=\frac{V_{1,\mathrm{th}}}{Z_{1,\mathrm{th}}+Z_\mathrm{par}} \tag{26}$$

并由电流分配得到：

$$\begin{cases}I_2=-I_1\dfrac{Z_{0\mathrm{f}}}{Z_{2,\mathrm{th}}+Z_{0\mathrm{f}}}\\ I_0=-I_1\dfrac{Z_{2,\mathrm{th}}}{Z_{2,\mathrm{th}}+Z_{0\mathrm{f}}}\end{cases} \tag{27}$$

式中：I_1、I_2、I_0分别为故障点的正序、负序、零序电流；$Z_{1,\mathrm{th}}$、$Z_{2,\mathrm{th}}$、$Z_{0,\mathrm{th}}$分别为故障点的正序、负序、零序等效阻抗；$Z_{0\mathrm{f}}$为包含接地过渡阻抗的等效零序阻抗；Z_par为负序网络与零序网络在故障点处的并联等效阻抗；$V_{1,\mathrm{th}}$为故障点处的正序等效电压；故障阻抗统一取：$Z_\mathrm{f}=0.001pu$，用一个非常小但非零的故障阻抗来逼近近区严重短路，同时避免数值求解时分母趋零、故障电流无穷大的问题。默认故障施加在发电机机端母线处。

1.2.8 评价指标

为保证不同工况结果的可比性，本文对功率跟踪与机电状态指标采用统一的统计窗口与判据。设输出电功率为$P_\mathrm{e}(t)$，设定功率为$P_\mathrm{set}(t)$，定义功率跟踪误差为：

$$e(t)=P_\mathrm{e}(t)-P_\mathrm{set}(t) \tag{28}$$

超调量定义为阶跃后输出功率峰值与阶跃目标值的差：

$$M_\mathrm{p}=\max_{t\ge t_\mathrm{s}}P_\mathrm{e}(t)-P_\mathrm{set}(t_\mathrm{s}^+) \tag{29}$$

T_s采用进入带宽并持续保持判据：当输出功率首次进入目标值$\pm\beta$带宽并在随后连续τ时间内始终保持在该带宽内时，取该时刻与t_s的时间差为调节时间：

$$T_\mathrm{s}=\min\left\{t-t_\mathrm{s}\,\middle|\,\begin{matrix}\left|P_\mathrm{e}(\xi)-P_\mathrm{set}(t_\mathrm{s}^+)\right|\le\beta P_\mathrm{set}(t_\mathrm{s}^+),\\ \forall\xi\in[t,t+\tau]\end{matrix}\right\} \tag{30}$$

本文取τ=5s, 并分别给出β=2%与β=5%两类带宽下的调节时间，以兼顾严格稳定性与工程可接受性。

2 仿真结果与分析

表 1 为本文仿真模型的主要参数[6,13,18]。储气罐、膨胀机及加热器相关参数主要参考文献[6,13]，并根据本文所研究的350 MW级系统进行了适配性调整；发电机参数参考文献[18]中的经典同步发电机暂态模型参数体系选取；空气绝热指数和定压比热容采用常温下空气的标准热物性参数。

表 1 本文仿真基准参数
Tab.1 Simulation benchmark parameters

类别	参数名称	取值
储气罐	储气罐容积 V_tank /m³	300 000
	储气罐初始压力 P_tank /MPa	10
	储气罐初始温度 T_tank /K	293
阀门	阀门综合流量系数 C_v	0.72
	阀前最小压力 p_min /MPa	0.1
	阀前最大压力 p_max /MPa	10
膨胀机	膨胀机出口压力 p_out /MPa	0.1
	膨胀机额定功率 P_e /MPa	350
	膨胀机等熵效率 η	0.85
	空气绝热指数 γ	1.4
	定压比热容 c_p /(J·kg^{-1}·K^{-1})	1005
加热器	加热器目标温度 T_tar /K	383
发电机	发电机容量基值 S_base /MVA	350
	系统频率基值 f_base /Hz	50
	惯性常数 H /s	5
	阻尼系数 D /pu	5
	d、q 轴同步电抗 X_d, X_q /pu	0.8/0.7
	定子电阻 R_a /pu	0.01
	d、q 轴暂态电抗 $X_{\mathrm{d}'}$, $X_{\mathrm{q}'}$ /pu	0.3/0.55
	d、q 轴暂态开路时间常数 $T_{\mathrm{d}0'}$, $T_{\mathrm{q}0'}$ /s	6.0/0.8

2.1 模型准确性验证

为验证所建模型的准确性，采用与文献[19]中相同的参数对释能过程进行仿真。本文模型对储气罐压力的仿真结果与文献中仿真结果对比如图 3 所示。在整个释能过程中，储气室压力的仿真值与设计值的相对误差始终保持在 1.5%以内，满足计算精度要求。

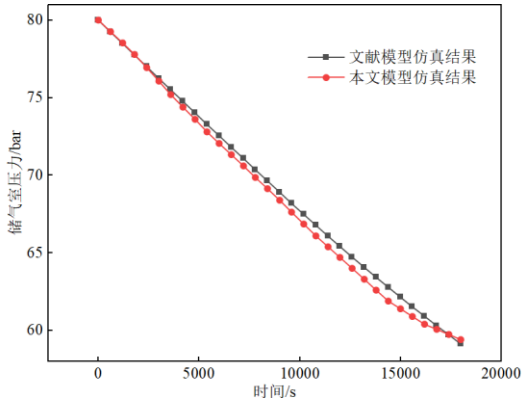


图 3 模型验证结果
Fig.3 Model validation results

2.2 系统动态响应分析

为验证所建发电侧 AA-CAES 动态模型的动态特性，本文分别在功率控制模式和阀门控制模式下设置了表 2 所示的扰动工况，各工况均在 t=5 s 时设置扰动，仿真步长为 0.01 s、时长为 100 s。

表 2 负荷阶跃与阀门阶跃扰动工况设置
Tab.2 Settings for load-step and valve-step disturbance cases

工况编号	控制模式	初始压力/MPa	扰动类型	扰动内容
A1	功率控制	10	负荷扰动	功率 175 MW，阶跃至 315 MW
A2		7	负荷扰动	功率 175 MW，阶跃至 315 MW
B1	阀门控制	10	阀门阶跃	阀门开度 20%，阶跃至 40%
B2		7	阀门阶跃	阀门开度 20%，阶跃至 40%

2.2.1 功率控制模式动态响应分析

在扰动开始前，系统稳定运行在 175 MW 负荷下，不同初始压力下输出电功率对比如图 4 所示，不同初始压力下储气罐压降对比如图 5 所示，不同初始压力下阀门开度对比如图 6 所示。由图 4 可以看出，在功率控制模式下，2 种工况在发生负荷阶跃扰动后，功率跟踪曲线快速恢复稳定，系统具备良好的动态稳定性。其中，A1 工况的最大超调为 57.17 MW，A2 工况为 53.10 MW，两者差异不大，但从调节时间来看，A2 工况进入 5%带宽调节时间为 25.40 s，略高于 A1 工况的 24.73 s。表明在初始压力较低时，系统达到稳态所需时间更长，动态响应速度下降。

从图 5 中可以看出，在整个释能的过程中，A1 工况的压降为 0.033 1 MPa，A2 工况的压降幅度为 0.035 6 MPa，增幅约为 7.41%。在初始压力较低时，为维持相同的功率输出，储气罐需释放更多气体，压力消耗相对更加明显。图 6 则进一步说明，A2 工况的阀门峰值开度为 0.641 pu，显著高于 A1 工况的 0.509 pu，且在系统稳定后，阀门开度仍维持在较高水平。在初始压力较低时，系统为维持相同输出和较高的质量流量，需要增大阀门开度来补偿储气罐压力不足带来的影响。

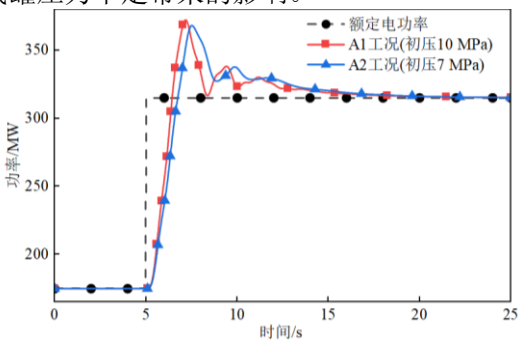


图 4 不同初始压力下输出电功率对比
Fig.4 Comparison of electrical power output under different initial pressures

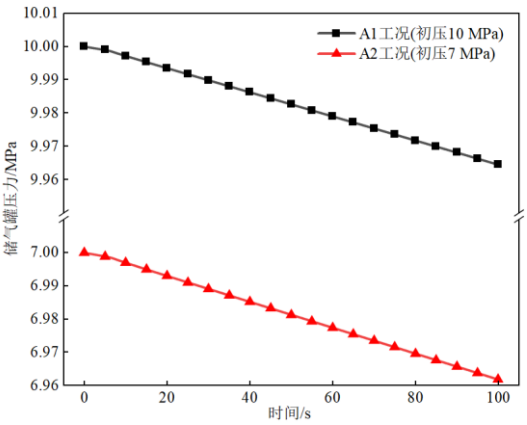


图 5 不同初始压力下储气罐压降对比
Fig.5 Comparison of tank pressure drop under different initial pressures

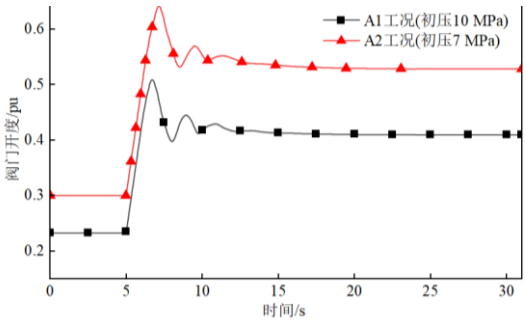


图 6 不同初始压力下阀门开度对比
Fig.6 Comparison of valve opening under different initial pressures

2.2.2 阀门控制模式动态响应分析

不同初始压力下输出电功率对比如图 7 所示，不同初始压力下的功角变化曲线如图 8 所示。在 0~5 s，系统稳定运行在阀门开度 20%的负荷下，由图 7 可以看出，阀门阶跃导致输出电功率显著提升，最终的稳定输出功率由储气罐压力和阀门开度共同决定。在 B1 工况中，阀门开度由 0.2 提升至 0.4 后，输出电功率由 149.75 MW 提升至 307.72 MW，功率增量为 157.96 MW。在 B2 工况中，功率由 114.71 MW 提升至 236.83 MW，功率增量为 122.12 MW，降幅约为 22.69%。由于低压力条件下提供的气体质量流量和可用能量水平较低，导致最大输出电功率明显小于高压力工况。

从功角变化曲线来看，阀门开度的阶跃引起了系统内机械功率与电磁功率的不平衡，因此功角出现了暂态变化。B1 工况的功角最大摆幅约 17.72°，B2 工况的功角最大摆幅约 12.97°，最终都稳定在了新的平衡点。由于 B1 工况下阀门开度变化后输出电功率的提升更明显，因此机械功率与电磁功率的不平衡更大，最终导致功角波动更剧烈、恢复时间更长。

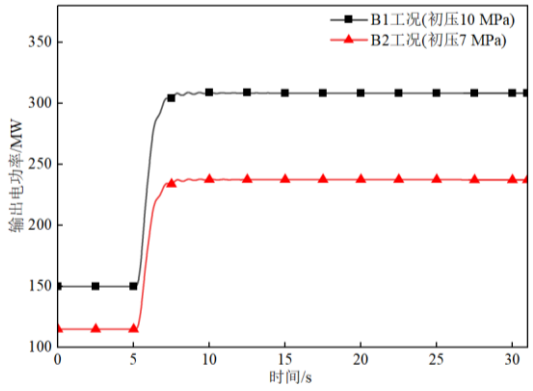


图 7 不同初始压力下输出电功率对比

Fig.7 Comparison of electrical power output under different initial pressures

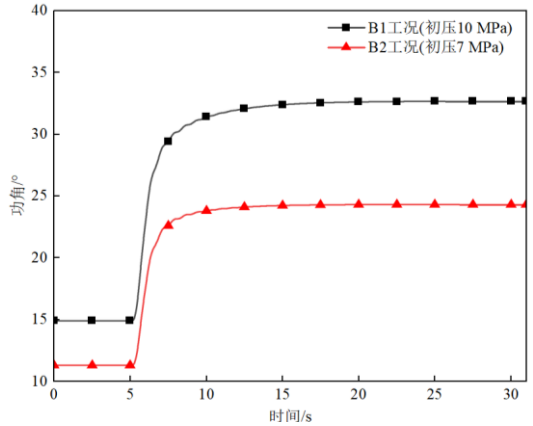


图 8 不同初始压力下的功角变化曲线

Fig.8 Power angle trajectories under different initial pressures

在功率控制模式下，系统以功率跟踪为目标，通过控制器控制阀门开度调节质量流量，因此在功率阶跃后能够较快地跟踪设定功率值，但存在较大的阀门动作和压力消耗。且在初始压力较低时，为维持同一功率目标往往需要更大的阀门开度，从而影响系统的稳定运行。

相比之下，阀门控制模式中阀门开度作为外部输入，功率曲线整体更平缓，系统运行更加稳定。总体来看，功率控制模式更适合评价系统在大功率变化条件下的调节能力和控制性能，阀门控制模式更适合分析系统释能输出能力，两者对比分析能够较为全面地描述系统发电侧的动态特性。

2.3 多故障暂态特性分析

为定量分析 AA-CAES 发电侧在热侧故障与电侧短路故障联合扰动下的暂态响应差异，本文设置了如表 3 所示的 8 个典型故障工况。各工况在故障开始前均稳定运行于 350 MW 条件下。

表 3 故障工况设置

Tab.3 Settings for fault cases

工况编号	故障类别	故障内容	故障时刻/s	持续时间/s
F1	热侧故障	一级加热器功率衰减30%	5	95
F2		一级加热器完全失效	5	95
F3	电侧故障	三相短路（3ph）	5	0.2
F4		单相短路（1ph）	5	0.2
F5		两相短路（2ph）	5	0.2
F6		两相接地短路（2ph_g）	5	0.2
F7	热电耦合	热侧一级加热器衰减30%，电侧三相短路	5（热侧）、10（电侧）	95（热侧）、0.2（电侧）
F8		热侧一级加热器失效，电侧两相接地短路	5（热侧）、10（电侧）	95（热侧）、0.2（电侧）

2.3.1 加热器故障分析

热侧故障下输出电功率响应及阀门开度响应分别如图 9、图 10 所示。从图 9、图 10 可以看出：在加热器功率衰减 30%的条件下，输出功率在故障触发后出现短时跌落，最大跌落功率为 9.60 MW，随后在功率控制作用下通过增大阀门开度实现再平衡，阀门最大开度达到 0.470；而当加热器完全失效时，功率跌落加深至 32.21 MW，最大阀门开度增大至 0.517。加热器供热能力直接决定膨胀段入口热状态与可用焓降，从而影响整个膨胀机的输

出机械功率，即使电侧并网条件未发生变化，也会导致机组电功率下降。当加热器供热能力下降时，为维持额定功率，系统会通过增大阀门开度，提高流量补偿热焓降不足，从而将电功率拉回设定值附近。

总体而言，热侧故障对机端电压与转速的直接冲击相对有限，但会压缩阀门调节裕度，为后续耦合电侧故障扰动时的抗干扰能力造成影响。

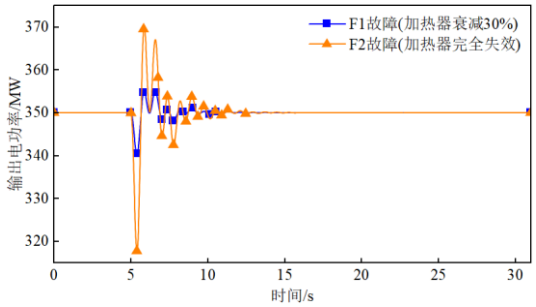


图 9 热侧故障下输出电功率响应

Fig.9 Output electric power response under thermal side fault

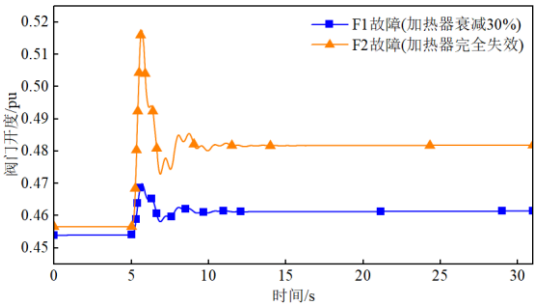


图 10 热侧故障下阀门开度响应

Fig.10 Valve opening response under thermal side fault

2.3.2 电网侧故障分析

图 11 为 4 类不同电侧故障的机端电压对比。不同短路类型导致的电压暂降深度差异显著：其中三相短路机端电压暂降最深，最低值降至 0.006 7 pu。单相短路与两相短路最低电压分别为 0.519 pu 与 0.441 pu，两相接地短路最低电压为 0.191 pu，相对于其余 2 种非对称故障，表现出更强的电压冲击。在故障切除后，机端电压迅速回升至额定值附近。

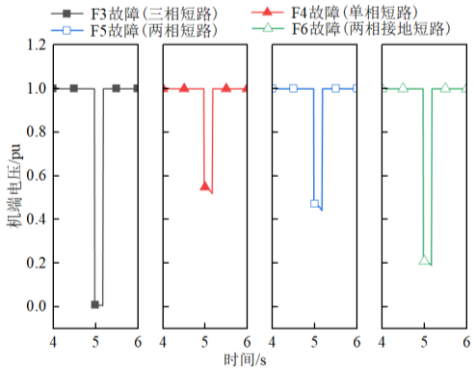


图 11 电侧故障下机端电压响应对比

Fig.11 Comparison of terminal voltage responses under electrical side fault

电侧故障下输出电功率响应对比如图 12 所示。由图 12 可知，由于短路导致机端电压骤降，电磁功率在故障持续期间显著降低，在 0.2 s 的故障持续期间内，P_e 出现显著跌落，功率恢复时间随故障严重程度增加而延长。以进入±5%带宽为准，F3—F6 故障的恢复时间分别为 12.70、8.58、9.37、10.96 s。在故障切除后的恢复过程中，P_e 呈现不同程度的摆振与超调。其中，三相短路对应的功率冲击最大、摆振更强，两相接地、两相、单相故障的振幅依次降低。

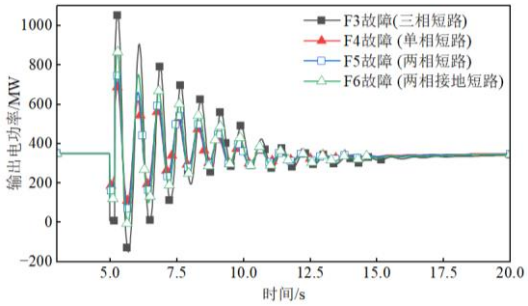


图 12 电侧故障下输出电功率响应对比

Fig.12 Comparison of output electric power responses under electrical side fault

图 13 为不同故障下的功角-转速相轨迹对比。由图可见，转速偏差峰值的变化规律与图 11 的电压暂降深度及图 12 的功率摆振结果保持一致，即故障越严重，转速偏差峰值越大，依次表现为：三相短路最大，约 23.08 mpu，单相和两相次之分别为 10.06、11.83 mpu，两相接地为 15.77 mpu。各故障下的功角-转速相轨迹均呈现螺旋收敛的趋势，这说明不同故障切除后系统均能恢复到稳定工况。且不同故障类型对应的轨迹外扩程度与收敛速度也符合三相故障最大，两相接地、两相、单相故障

依次降低的规律。

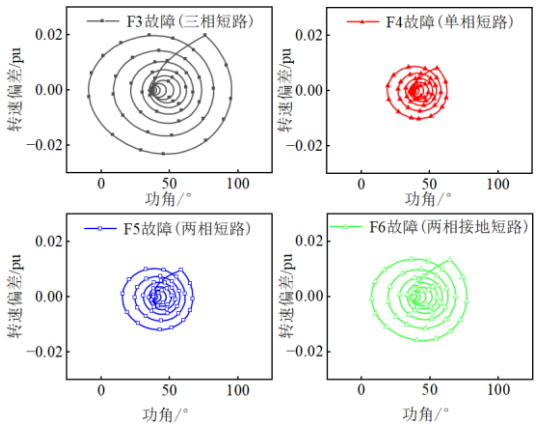


图 13 电侧故障下功角−转速相轨迹对比

Fig.13 Comparison of power angle–speed phase trajectories under electrical side fault

为突出不同短路类型对同步机内部电磁暂态的影响，选取暂降最深、扰动最强的三相短路故障和不对称故障两相接地短路故障来展示四阶发电机模型的内部状态量，具体如图 14 所示。由图 14 可知，故障发生后，发电机的内部暂态电势均呈现明显的动态响应，且不同短路类型下的变化幅度和恢复过程存在差异。在故障发生的瞬间，$E_{q'}$ 突降并伴随着衰减振荡，随后逐步回升至新的稳定水平。相比之下 $E_{d'}$ 的变化幅度较小，但同样存在振荡过程，说明故障扰动不仅影响端电压、功角等外部变量，同样也会引起发电机内部的电磁暂态过程。对比 2 种故障类型可以发现，三相短路下 $E_{q'}$ 的跌落更深、振荡更明显，两相接地短路下 $E_{q'}$ 的下降幅度相对较小，过程更平缓。

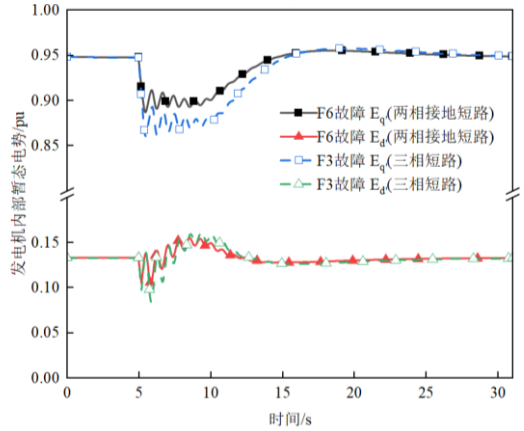


图 14 不同短路类型下 $E_{q'}$ 与 $E_{d'}$ 暂态响应对比

Fig.14 Comparison of transient responses of $E_{q'}$ and $E_{d'}$ under different short-circuit fault types

2.3.3 热电耦合故障分析

图 15、图 16 给出了组合故障下的输出电功率响应和阀门开度响应。热电耦合故障短路期间的电压暂降与纯电侧故障基本一致。且由于热侧故障引起的功率振荡对后续短路故障切除后的恢复时间也基本不变。但 F7 故障和 F8 故障所对应的最大阀门开度分别为 0.573 和 0.578。显著高于热侧单独故障时的峰值水平。因此，热侧故障不一定直接造成电压严重暂降，但会通过抬升阀门工作点、改变机械功率形成过程，使电侧扰动发生时系统可调空间变小，从而增加恢复阶段的控制代价并增大系统失稳的风险。

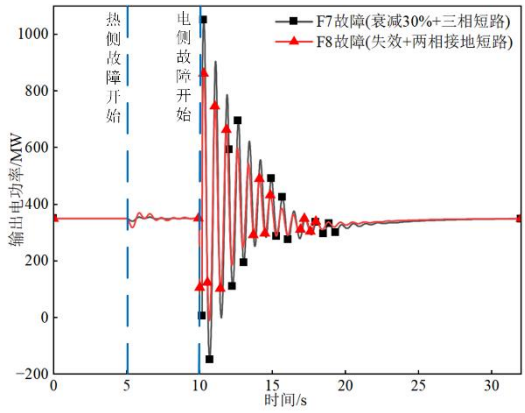


图 15 组合故障下输出电功率响应

Fig.15 Output electric power response under combined fault

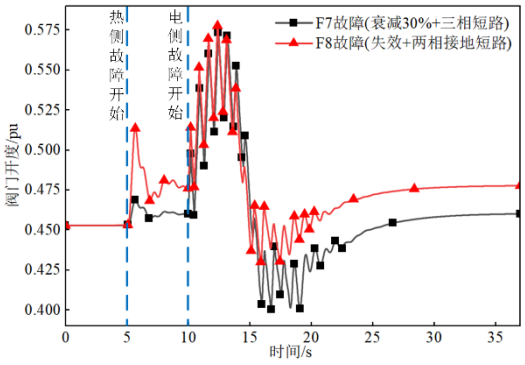


图 16 组合故障下阀门开度响应

Fig.16 Valve opening response under combined fault

综上，热侧故障不会对机端电压与转速有太大冲击，但会影响阀门调节裕度，使得系统的抗干扰能力下降。电侧故障会显著影响系统的电压暂降与机电摆动过程。

3 结 论

本文基于 Python 平台建立了 350 MW 级 AA-CAES 发电侧动态模型，并采用四阶同步发电机实现机端电压、输出功率、功角与转速的同步计算，后续开展了多工况与多故障暂态指标化分析，主要结论如下。

1）在功率控制模式下，系统能够实现大幅度功率阶跃扰动的稳定运行，对比不同初始压力发现，初始压力降低后，为维持同一功率目标，阀门开度需要明显抬升，储气压力消耗趋势更明显，进入稳态的时间略有增加。在阀门控制模式下，系统功率波动整体较小，调节过程相对平缓。2 种模式对比分析能够较为全面地刻画发电侧多工况动态特性，为后续的故障暂态分析提供运行基础。

2）热侧加热器故障的主要影响为压缩可调裕度。当加热能力衰减严重度为 0.3 时，输出功率最大跌落约 9.60 MW，阀门峰值约 0.470；当加热能力严重退化或等效失效严重度为 1.0 时，功率跌落加深至约 32.21MW，阀门峰值升至约 0.517。热侧故障对机端电压与转速的直接冲击相对有限，但会抬升阀门工作点、压缩调节裕度。

3）电网侧短路故障的严重程度由故障类型决定。在 0.2 s、故障阻抗 0.001 pu 的短路设定下，三相短路机端电压最低降至 0.006 7 pu，功率恢复时间约 12.70 s，转速偏差峰值约 23.08 mpu；单相与两相短路电压暂降较小、恢复更快；两相接地短路暂降介于其间。相轨迹均呈螺旋收敛，在现有参数与控制策略下系统具备正阻尼与渐近稳定性。

4）热电耦合故障的风险在于恢复阶段更长。热电耦合故障中电压暂降深度基本与纯电侧短路故障类型一致，但热端退化会提前占用阀门调节裕度，阀门开度峰值可达 0.573~0.578，增加恢复阶段时间与失稳风险。

[参 考 文 献]

［1］ 冯栋. "双碳"目标下 350MW 热电联产机组灵活调峰技术的探索与展望[J]. 能源研究与利用, 2025(6): 39.

Feng D. Exploration and prospect of flexible peak regulation technology for 350MW cogeneration units under the "dual-carbon" target[J]. Energy Research & Utilization, 2025(6): 39.

［2］ 冯慧敏, 盛健, 张华. 压缩空气储能系统热能储存与利用研究进展[J]. 热能动力工程, 2024, 39(10): 10.

Feng H M, Sheng J, Zhang H. Research progress on the thermal energy storage and utilization of compressed air energy storage system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(10): 10.

［3］ 李盼, 杨晨, 陈雯, 等. 压缩空气储能系统动态特性及其调节系统[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2295.

Li P, Yang C, Chen W, et al. Dynamic characteristics of compressed air energy storage system and the regulation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2295.

［4］ 李连生, 杨启超, 赵远扬. 微小型压缩空气储能系统研究[J]. 流体机械, 2014, 42(3): 24.

Li L S, Yang Q C, Zhao Y Y. Research on micro-small scale of compressed air energy storage system[J]. Fluid Machinery, 2014, 42(3): 24.

［5］ 张卫国, 吴闯, 罗方, 等. 300MW 级绝热压缩空气储能系统性能分析与优化研究[J]. 热力发电, 2026, 55(2): 32.

Zhang W G, Wu C, Luo F, et al. Performance analysis and optimization of 300MW adiabatic compressed air energy storage system[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(2): 32.

［6］ 王凯轩, 牛东圣, 程柯楠, 等. 基于动态仿真的绝热压缩空气储能系统设计与参数分析[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(1): 188.

Wang K X, Niu D S, Cheng K N, et al. Design and parameter analysis of an adiabatic compressed air energy storage system based on dynamic simulation[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(1): 188.

［7］ 李双江, 肖枫, 陈伟, 等. 先进绝热压缩空气储能系统储能阶段建模仿真和动态分析[J]. 山东科学, 2024, 37(5): 42.

Li S J, Xiao F, Chen W, et al. Modeling, simulation and dynamic analysis of the energy stage of advanced adiabatic compressed air energy storage system[J]. Shandong Science, 2024, 37(5): 42.

［8］ 袁照威, 李峻, 张春琳, 等. 300MW 级压缩空气储能电站 DCS 一体化技术[J]. 南方能源建设, 2025, 12(6): 33.

Yuan Z W, Li J, Zhang C L, et al. Integrated DCS technology for a 300MW compressed air energy storage

power station[J]. Southern Energy Construction, 2025, 12(6): 33.

［9］ 覃子珍. 300 MW 级压缩空气储能系统压缩机设计及优化运行研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2025.

QIN Z Z. Study on compressor design and optimized operation for 300MW-class compressed air energy storage system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2025.

［10］ 洪杨. 火电机组耦合压缩空气储能系统运行方式优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2024.

Hong Y. Research on optimization of operation mode of coupled compressed air energy storage system for thermal power units[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2024.

［11］陈辉, 李文, 盛勇, 等. CAES 释能过程多工况动态仿真及效率分析[J]. 动力工程学报, 2023, 43(7): 869.

Chen H, Li W, Sheng Y, et al. Dynamic simulation and efficiency analysis of energy release process in compressed air energy storage under multi conditions[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(7): 869.

［12］易聪. 压缩空气储能系统建模与控制系统设计[D]. 北京: 华北电力大学, 2024.

Yi C. Modeling and control system design of compressed air energy storage system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2024.

［13］李诚. 压缩空气储能系统建模仿真与特性分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.

Li C. Modeling, simulation and characteristic analysis of compressed air energy storage systems[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.

［14］冯庭勇. 压缩空气储能发电系统涉网性能仿真研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.

Feng T Y. Simulation study on grid-connected performance of compressed air energy storage power Generation systems[D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.

［15］陈思源, 陈来军, 崔森, 等. 考虑多级压缩机耦合特性的压缩空气储能系统功率跟踪控制[J]. 中国电机工程学报, 2026, 46(7): 2615.

Chen S Y, Chen L J, Cui S, et al. Power tracking control of compressed air energy storage system considering coupling characteristics of multi-stage compressors[J]. Proceedings of the CSEE, 2026, 46(7): 2615.

［16］Mazloum Y, Sayah H, Nemer M. Dynamic modeling and simulation of an Isobaric adiabatic compressed air energy storage (IA-CAES) system[J]. Journal of Energy Storage, 2017, 11: 178.

［17］Mazloum Y, Sayah H, Nemer M. Exergy analysis and exergoeconomic optimization of a constant-pressure adiabatic compressed air energy storage system[J]. Journal of Energy Storage, 2017, 14(Part 1): 192.

［18］Kundur P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.

［19］Liu Y H, Liu Z C, Chen L P, et al. Full-cycle dynamic modeling and thermodynamic performance evaluation of compressed air energy storage systems incorporating thermal inertia[J]. Results in Engineering, 2025, 28: 107243.

（责任编辑 邓玲惠）