第 52 卷 第 7 期：3221-3233 高电压技术 Vol.52, No.7: 3221-3233
2026 年 7 月 31 日 High Voltage Engineering July 31, 2026
**DOI**: 10.13336/j.1003-6520.hve.20251633

# 基于双轴励磁同步机组的先进绝热压缩空气储能发电系统

唐梓睿[1,2]，王　丹[1,2]，姚嘉宁[1,2]，成昕雨[1,2]，贾思思[1,2]，毛承雄[1,2]
（1. 强电磁技术全国重点实验室，武汉 430074；2. 华中科技大学电气与电子工程学院，武汉 430074）

**摘　要**：为应对电力系统对无功电压支撑能力和系统稳定性日益提高的要求，研究提出了一种基于双轴励磁同步机组的先进绝热压缩空气储能发电系统，并结合调相运行模式提高设备利用率和电网支撑性能，同时采用转速 PI 控制与改进不完全微分算法优化转速调节能力和动态性能，设计了对应的转速-功率跟踪励磁控制策略，构建了该新型压储系统数学模型，并基于 MATLAB/Simulink 搭建仿真模型进行对比分析。仿真结果表明，提出的新型压储系统较传统压储系统在发电与调相运行模式以及切换过程中机端电压和转速的调节能力、暂态稳定性等方面均有明显提升，能够有效增强电力系统的动态性能和稳定性。

**关键词**：压缩空气储能；双轴励磁发电机；暂态工况；双通道控制；励磁控制

## Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage Power Generation System Based on Dual-excited Synchronous Generator

TANG Zirui[1,2], WANG Dan[1,2], YAO Jianing[1,2], CHENG Xinyu[1,2], JIA Sisi[1,2], MAO Chengxiong[1,2]
(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology, Wuhan 430074, China;
2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract**: To address the increasingly high requirements of power systems for reactive power and voltage support capability as well as system stability, this study proposes an advanced adiabatic compressed air energy storage(CAES) power generation system based on a dual-excited synchronous unit. Meanwhile, the phase modulation mode is integrated to improve equipment utilization efficiency and power grid support performance. In addition, the proportional-integral (PI) speed control and an improved incomplete differentiation algorithm are adopted to optimize the speed regulation capability and dynamic performance. Correspondingly, a speed-power tracking excitation control strategy is designed, and a mathematical model of this novel CAES system is constructed. Furthermore, a simulation model is built based on MATLAB/Simulink for comparative analysis. The simulation results indicate that, compared with the traditional compressed air energy storage system, the proposed novel compressed air energy storage system exhibits significant improvements in the regulation capability of terminal voltage and speed, as well as transient stability during the power generation mode, phase modulation mode, and the switching process between these two modes. Therefore, the dynamic performance and stability of the power system can be effectively enhanced.

**Key words**: compressed air energy storage; dual-excited synchronous generator; transient operation; dual channel control; excitation control

## 0　引言

近年来，随着新能源发电规模的不断扩大，尤其是风能、太阳能等可再生能源的间歇性和波动性日益对电网运行带来挑战，电网对负荷调节、削峰填谷和电压稳定等方面的要求也随之提高[1-2]。压缩空气储能(compressed air energy storage, CAES)作为一种大规模物理储能技术，因其循环次数多、使用寿命长以及地理适应性强的优势，正逐步成为解决新能源弃风弃光问题及实现能量大规模时空转移的重要手段[3-4]。CAES 技术已从早期依赖天然气补燃、存在碳排放的传统路线，逐步向以先进绝热压缩空气储能(advanced adiabatic compressed air energy storage, AA-CAES)为主导的非补燃路线转型，AA-CAES 通过回收存储压缩过程热量实现零碳排放与能源高效利用，目前国内外多数示范及商业化

**基金资助项目**：国家重点研发计划(2023YFB2406500)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2023YFB2406500).

项目(如我国江苏金坛盐穴 CAES 国家示范项目、加拿大 Hydrostor 公司试验电站等)均采用该技术路线[5-6]。

但在实际应用中，CAES 仍然存在一定局限性，为满足未来电力系统对电压支撑、动态无功补偿以及系统整体安全稳定性的要求，近年来对 CAES 系统运行模式的创新探索不断深入。其中，调相运行模式被认为是一种极具潜力的改进方向。传统 CAES 系统仅在发电需求时运行，其余时间处于停机状态，导致设备闲置并增加启停损耗。为提高设备利用率、降低维护成本并增强电网无功支撑能力，文献[7]提出了 CAES 调相运行模式，核心是在发电结束后，机组并不停机，保持同步运行并充当调相机，为电网提供无功支撑，同时提高设备利用率。具体而言，在调相模式下，发电机仅消耗极少的高压空气以维持同步运转，其励磁系统通过调节无功功率实现动态电压支撑，功能上等效于同步调相机。金坛盐穴压缩空气储能电站调相运行 19 h，盐穴压力仅降低约 0.15 MPa，表明引入调相模式对电站调峰能力的影响非常有限，此外，CAES 系统可在储能、发电和调相 3 种模式间灵活切换，提升响应速度和运行灵活性，实现更高的经济性和整体效率[8]。

双轴励磁同步发电机(dual-excited synchronous generator, DESG)是一种具有良好调节性能的发电机类型，在 20 世纪 50 年代，前苏联学者就已开始研究 DESG 的结构与控制策略[9]。近年来，随着其在解决我国电力系统中无功过剩和提升稳定性等方面的潜力被进一步认识，国内对 DESG 的研究不断深入。文献[10]研究了 DESG 转子阻尼影响动态特性问题，为提升机组动态性能和系统阻尼提供理论依据。文献[11]提出了一种常规同步电机对拖双轴励磁电机的新型潮流控制器拓扑结构。文献[12]则深入研究了 DESG 在调整电网频率波动方面的结构特性。文献[13]研究了 DESG 作为适合风能转换系统的新型发电系统，通过引入 DESG 调控无功功率，结合类似于双馈异步风力发电机(doubly-fed induction generator，DFIG)的变速恒频发电系统，可实现最大化有功输出并控制无功输出。与传统同步发电机的电气结构不同，DESG 转子设有两组轴线 90°夹角的励磁绕组，两个绕组独立控制，可在不改变转子位置的情况下改变励磁电流的大小和方向，相较传统同步机具备更好的暂态稳定性、深度进相能力和更快的响应时间[14]。

要充分发挥 DESG 的调节性能，必须要有与之相适应的励磁控制方式。文献[9]对双轴励磁电机的各种励磁控制方式进行了分类总结。文献[15]在非线性励磁控制的基础上，提出了双轴励磁电机的微分反馈非线性最优励磁控制，这种励磁控制策略可以进一步提高电力系统的暂态及动态稳定性，且更易于操作、更适用于工程应用。在 DESG 的转子与励磁电流解耦开来的特性基础上，文献[16]提出了双通道励磁控制策略，可实现 DESG 的输出有功功率和无功功率的解耦。文献[17]将全控器件励磁系统与双轴励磁同步调相机结合，提出了双轴全控器件励磁同步调相机数学模型与控制策略。文献[18]在双通道励磁控制策略的基础上提出功率跟踪励磁控制策略，在功率的调节上具备较好的动态性能。

在压缩空气储能系统逐步引入调相运行模式的背景下，具备更强无功调节能力和深度进相特性的 DESG 成为提升调相型 CAES 系统运行性能的潜在选择。然而现有 DESG 的相关研究主要集中于常规同步发电或同步调相应用场景，其运行工况相对单一，当应用于具备调相运行模式的 CAES 系统时，DESG 机组需在发电、调相模式快速切换的复杂工况下运行，对系统的转速调节能力与暂态协调控制具有更高要求，同时 DESG 励磁控制策略研究多以功率或电压调节为主，缺乏考虑转速动态特性的协同控制机制，在应对大功率阶跃等工况时，仍可能引发转速、机端电压等状态量的较大波动。此外，针对 DESG 与 AA-CAES 深度融合条件下的系统架构、运行机理及其对电网无功支撑能力和暂态稳定性影响的系统性研究仍相对不足。

针对上述问题，本文在 AA-CAES 发电系统的透平发电机中引入双轴励磁技术，提出了一种基于双轴励磁同步机组的先进绝热压缩空气储能(dual-excited advanced adiabatic compressed air energy storage, DE-CAES)发电系统，并结合调相运行特性，设计了一套转速-功率跟踪励磁控制策略，实现转速与电磁功率的协同调控，提升其在较大波动下的系统灵活性和稳定性，弥补现有传统 AA-CAES 及 DESG 相关研究在上述应用场景下的不足，最后通过仿真验证了系统的可行性和有效性。

## 1 DE-CAES 系统方案与典型工作模式

### 1.1 DE-CAES 系统方案

本文提出的 DE-CAES 是在传统 AA-CAES 发

电系统引入双轴励磁技术的新型压缩空气储能系统，其储能部分和释能的膨胀机部分与传统AA-CAES一致，而发电机部分由传统单轴励磁同步发电机替换为电网支撑性能和出力调节能力优于传统发电机的DESG。本文后续研究对象为DE-CAES的发电系统部分，原理示意图见图1。本部分介绍AA-CAES和DESG的工作原理，最后详细介绍DE-CAES的优势。

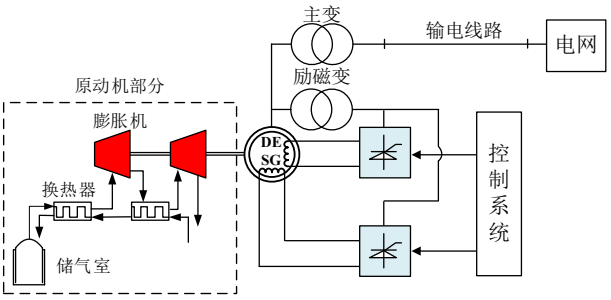



图1　DE-CAES原理示意图

Fig.1　Schematic diagram of DE-CAES

#### 1.1.1　AA-CAES原理

AA-CAES是一种新型的压缩空气储能技术，借助导热油、熔融盐等高效储热介质回收利用压缩热能，可在提高能源利用效率的同时降低对化石燃料的依赖。其核心原理是在电力需求的低谷，利用弃风电、弃光电或低价电力驱动压缩机，将空气压缩后存储在储气室中，同时采用热能储存技术回收压缩过程中产生的热能，而在电力需求高峰期，将储气室中高压空气释放，与储存的压缩热共同作用驱动膨胀机，进而带动发电机发电，实现电能的高效回馈。这一过程摒弃了传统压缩空气储能系统中天然气补燃的环节，使整个系统运行更加清洁且可持续，符合当前清洁低碳能源发展趋势[19]。

在储能阶段，AA-CAES系统采用多级压缩和级间换热技术，降低了压缩机的能耗；在释能阶段，通过多级膨胀和级间再热的方式，提高了发电机的做功能力，从而提升了系统的整体效率，如附录A图A1所示的多级压缩、多级膨胀(图中只画出二级)的AA-CAES系统，其部件主要包括有：压缩机、膨胀机、储气室、换热器、储热罐、发电机、电动机等[20-21]。

#### 1.1.2　DESG工作原理

DESG的定子结构与传统单轴同步发电机基本一致，而电气结构相比单轴同步发电机最大区别为转子上有两个轴线夹角为90°的$d$、$q$轴励磁绕组，两者相互独立，通过分别控制$d$、$q$轴励磁电流从而改变两绕组的合成磁势，可以在不改变转子位置的情况下调节励磁磁动势的大小和方向[12]。

DESG将转子与励磁磁势解耦开来的特性，不仅使其具备更优越的暂态稳定性，不受静稳极限的限制，可以在深度进相工况下工作[22]，还能在系统遭受大扰动时，迅速控制励磁电流的大小以改变励磁磁动势的大小和方向，实现对发电机输出电磁功率的控制，从而使发电机功角维持在稳定范围内，保证发电机的稳定运行和系统的整体稳定。同时DESG采取特定的励磁控制策略，可以实现机端有功、无功功率独立控制。基于各种对DESG有限元模型的分析表明，DESG比传统同步发电机更加稳定可靠[23-24]。

### 1.2　DE-CAES系统典型工作模式及其优势

#### 1.2.1　DE-CAES系统典型工作模式

DE-CAES系统主要有以下3种典型工作模式。

1）压缩模式：在电力负荷低谷时，CAES系统中压缩机处于压缩储能模式，利用低谷电驱动空气压缩并完成储能。DESG机组根据电网无功支撑需求的不同运行在不同工况：当电网存在一定无功支撑需求时，DESG运行于调相工况，仅消耗极少的高压空气以维持同步运转，为电力系统提供无功调节；在电网无需额外无功支撑时，DESG运行于旋转备用或停机状态，减少调相运行带来的不必要能耗，从而提高系统运行的经济性。

2）发电模式：在用电高峰时，系统切换至发电模式，膨胀机释放高压空气驱动DESG发电。

3）调相模式：在电力负荷平谷时，系统切换至仅调相运行模式，此时压缩机不工作，DESG机组运行于调相工况为电力系统提供无功调节。

#### 1.2.2　DE-CAES优势

DE-CAES机组在发电运行模式下，可以独立控制发电机有功和无功功率，具备优于传统同步发电机的出力调节能力，提高了电力系统的功率和电压动态性能[25]。而在调相运行模式下，能够在优于普通发电机的更宽的无功调节范围内提供电压支撑，增强系统在新能源大规模接入后的电压调节能力。此外，双轴励磁技术可实现短时进相能力的大幅提升，使机组具备与迟相过载能力相当的瞬态无功支撑能力，在电网扰动或新能源波动剧烈时快速响应，提高系统的动态稳定性[26]。

综合来看，CAES的调相模式拓展了系统功能，

而在其基础上采用双轴励磁技术的 DE-CAES 具备更好的暂态稳定性与深度进相能力，进而在未来新能源电力系统中具备更广泛的应用前景。

## 2 DESG 的数学模型及控制策略

DESG 提高电力系统暂态稳定性的能力主要依赖于其采用的控制策略[27]，为了提高 DESG 转速的调节能力，使其具备更好的无功补偿能力和电网支撑性能，本文设计了转速-功率跟踪励磁控制策略。本部分详细介绍 DE-CAES 中采用的 DESG 的数学模型及控制策略，DESG 的示意图如图 2 所示。

### 2.1 DESG 的数学模型

由图 2 所示，DESG 的定子三相绕组的对称轴 a，b，c 在空间上互差 120°电角度，而转子两相励磁绕组的对称轴 $d$，$q$ 在空间上互差 90°机械角，且 $q$ 轴超前 $d$ 轴。图中 $\omega$ 为转子转速；$F_d$ 与 $F_q$ 分别为 $d$ 轴与 $q$ 轴励磁绕组的磁动势。定子的位置相对静止，而转子以同步转速沿逆时针方向旋转。在这个过程中，转子 $d$ 轴超前定子 a 轴 $\theta_{\mathrm{m}}$ 电角度。本文采用以 $x_{ad}$ 为基准的标幺值系统，忽略磁饱和、铁耗等高阶非线性因素，建立 $dq0$ 坐标系下的 DESG 数学模型，包括电压基本方程、转子运动方程和功率方程。为简化标幺值方程书写，本文提及的标幺值方程均忽略上标*。

DESG 的电压基本方程如式(1)所示，该方程是在传统单轴同步发电机 $dq0$ 坐标系电压方程的基础上，引入 $q$ 轴励磁绕组后得到的扩展形式，用以描述双轴励磁结构下电机的电气特性。

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \\ u_{\mathrm{f}d} \\ u_{\mathrm{f}q} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = p\begin{bmatrix} -x_d & 0 & 0 & x_{\mathrm{a}d} & 0 & x_{\mathrm{a}d} & 0 \\ 0 & -x_q & 0 & 0 & x_{\mathrm{a}q} & 0 & x_{\mathrm{a}q} \\ 0 & 0 & -x_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -x_{\mathrm{a}d} & 0 & 0 & x_{\mathrm{f}d} & 0 & x_{\mathrm{a}d} & 0 \\ 0 & -x_{\mathrm{a}q} & 0 & 0 & x_{\mathrm{f}q} & 0 & x_{\mathrm{a}q} \\ -x_{\mathrm{a}d} & 0 & 0 & x_{\mathrm{a}d} & 0 & x_D & 0 \\ 0 & -x_{\mathrm{a}q} & 0 & 0 & x_{\mathrm{a}q} & 0 & x_Q \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_{\mathrm{f}d} \\ i_{\mathrm{f}q} \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -r & \omega x_q & 0 & 0 & -\omega x_{\mathrm{a}q} & 0 & -\omega x_{\mathrm{a}q} \\ -\omega x_{\mathrm{a}d} & -r & 0 & \omega x_{\mathrm{a}d} & 0 & \omega x_{\mathrm{a}d} & 0 \\ 0 & 0 & -r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{\mathrm{f}d} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_{\mathrm{f}q} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_{\mathrm{f}d} \\ i_{\mathrm{f}q} \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中：$u_d$、$u_q$、$u_0$、$u_{\mathrm{f}d}$、$u_{\mathrm{f}q}$ 分别为 DESG 的定子 $dq0$ 绕组和励磁 $dq$ 绕组的电压；$i_d$、$i_q$、$i_0$、$i_{\mathrm{f}d}$、$i_{\mathrm{f}q}$、$i_D$、$i_Q$ 分别为 DESG 的定子 $dq0$ 绕组、励磁 $dq$ 绕组和阻尼 $DQ$ 绕组的电流；$x_d$、$x_q$ 和 $x_0$ 分别为 $dq0$ 轴的同步电抗；$x_{ad}$ 和 $x_{aq}$ 分别为 $dq$ 轴的电枢反应电抗；$x_{fd}$ 和 $x_{fq}$ 分别为 $dq$ 轴的励磁绕组电抗；$x_D$ 和 $x_Q$ 分别为 $DQ$ 轴的阻尼绕组电抗；$r$、$r_{\mathrm{f}d}$、$r_{\mathrm{f}q}$、$r_D$、$r_Q$ 分别为 DESG 的定子绕组、励磁 $dq$ 绕组和阻尼 $DQ$ 绕组的电阻；$p$ 为微分算子。

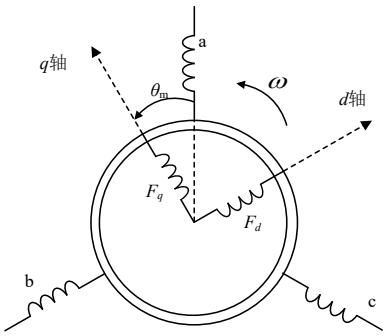



图 2 DESG 示意图

Fig.2 Schematic diagram of DESG

DESG 的转子运动方程及功率方程与传统单轴发电机一致，见附录 A 中的式(A1)—(A4)。

### 2.2 DESG 励磁策略及调速器控制策略

#### 2.2.1 DESG 励磁策略

目前 DESG 采用最多的励磁控制方法是双通道励磁控制策略，其控制框图如附录 A 图 A2 所示，具体策略为将励磁电流在同步坐标系中投影，将 $d$ 轴励磁电流 $I_{\mathrm{f}d}$ 和 $q$ 轴励磁电流 $I_{\mathrm{f}q}$ 投影到同步轴 $x$ 轴和 $y$ 轴(其中 $y$ 轴平行于机端电压相量，$x$ 轴超前于 $y$ 轴 90°)，得到 $x$ 轴励磁电流 $I_{\mathrm{f}x}$ 和 $y$ 轴励磁电流 $I_{\mathrm{f}y}$。其中 $x$ 轴励磁电流 $I_{\mathrm{f}x}$(电压 $U_{\mathrm{f}x}$)控制无功通道，控制机端输出无功或者机端电压的稳定；而 $y$ 轴励磁电流 $I_{\mathrm{f}y}$(电压 $U_{\mathrm{f}y}$)控制有功通道，保持控制过程中转子机械运动的稳定，可实现 DESG 的输出有功功率和无功功率的解耦。近年来提出的功率跟踪励磁控制策略引入不完全微分控制，显著增强系统抗高频干扰能力以及减小动态过程中的功率振荡幅值与振荡时间，具备较好的动态性能。

DE-CAES 具备压缩、发电以及调相 3 种工作模式，其中的 DESG 机组由 CAES 系统中的膨胀机驱动，具备调相与发电两种运行工况。在 DESG 运行工况切换过程中，机械转矩 $T_{\mathrm{m}}$ 与电磁转矩 $T_{\mathrm{e}}$ 会发生较大的变化，二者的动态失衡会导致转子转速在短时间内出现显著波动。采用传统控制策略时，对转速、转矩失

衡的调节能力有限，在工况切换中，易引发转子转速、机端电压、功角等关键状态量较大波动，因此一般会使工况切换中功率的过渡过程延长来应对状态量的大幅震荡，最终造成运行工况切换速度慢，难以满足电网对 CAES 系统灵活响应的需求。

为了有效抑制这些波动，保障系统灵活性与稳定性，本文在功率跟踪励磁控制策略基础上进行改进，设计了转速-功率跟踪励磁控制策略，加入转速 PI 控制，在机组转速偏离额定值时，转速偏差信号通过改变 $y$ 轴有功通道励磁控制，改变实际 $d$、$q$ 轴励磁电压及相应的励磁电流分布，从而影响气隙磁场强度与定子电磁功率输出。电磁功率的变化进一步作用于发电机电磁转矩，使其与原动机提供的机械转矩重新达到平衡，以具备更好的转子运动调节能力，可在模式切换中减小转速失衡的影响，加快模式切换的过程，从而获得更好的发电机动态性能；同时改进了功率跟踪策略中不完全微分的传递函数，采用相互独立的微分系数 $D$ 与低通滤波截止频率 $N$，一方面利用 $N$ 的滤波特性有效抑制高频噪声对励磁控制信号的干扰，避免控制指令抖动，另一方面两者解耦设计可降低参数间的耦合关联，无需反复迭代调试，显著提升了参数整定的便捷性与控制鲁棒性；同时将改进后的不完全微分模型等效为负反馈积分的方式，对算法的资源消耗更少，为仿真提供便利。转速-功率跟踪励磁控制策略的有功通道控制方程如式(2)，无功通道控制方程分为定电压控制与定无功控制，分别如式(3)和式(4)，控制策略框图见图 3。

$$U_{\mathrm{fy}}=U_{\mathrm{fy0}}+\left(\left(K_{\mathrm{P}}+D_{\mathrm{P}}\frac{1}{1+s/N_{\mathrm{P}}}\right)\Delta P+\left(K_{\omega}+\frac{I_{\omega}}{s}\right)\Delta\omega\right)\frac{r_{\mathrm{f}}}{x_{\mathrm{af}}} \tag{2}$$

$$U_{\mathrm{fx}}=U_{\mathrm{fx0}}+\left(K_{\mathrm{U}}+D_{\mathrm{U}}\frac{1}{1+s/N_{\mathrm{U}}}\right)\Delta U\frac{r_{\mathrm{f}}}{x_{\mathrm{af}}} \tag{3}$$

$$U_{\mathrm{fx}}=U_{\mathrm{fx0}}+\left(K_{\mathrm{Q}}+D_{\mathrm{Q}}\frac{1}{1+s/N_{\mathrm{Q}}}\right)\Delta Q\frac{r_{\mathrm{f}}}{x_{\mathrm{af}}} \tag{4}$$

式中：$\Delta P=P-P_{\mathrm{ref}}$；$\Delta\omega=\omega-\omega_{\mathrm{ref}}$；$\Delta U=U-U_{\mathrm{ref}}$；$\Delta Q=Q-Q_{\mathrm{ref}}$；$P$、$U$、$\omega$、$Q$ 分别为 DESG 的输出有功功率、机端电压、转子转速、输出无功功率；$P_{\mathrm{ref}}$、$U_{\mathrm{ref}}$、$\omega_{\mathrm{ref}}$、$Q_{\mathrm{ref}}$均为对应指令值；$K$、$I$、$D$ 和 $N$ 分别为比例系数、积分系数、微分系数和滤波系数，下标对应于 $P$、$U$、$\omega$、$Q$；$r_{\mathrm{f}}/x_{\mathrm{af}}$为将励磁电压以额定空载电势为基准值归算到定子侧的系数；$U_{\mathrm{fy}}$、$U_{\mathrm{fx}}$分别为控制系统计算得到的 $y$、$x$ 轴励磁电压；$U_{\mathrm{fy0}}$、$U_{\mathrm{fx0}}$为前一状态的计算值。

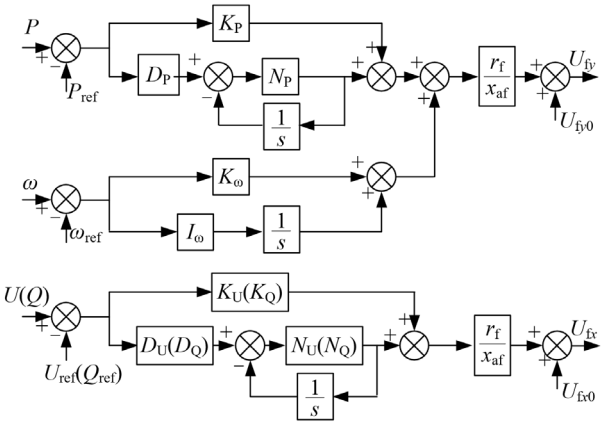



图 3　DESG 控制策略传递函数框图

Fig.3　Transfer function block diagram of DESG control strategy

### 2.2.2　调速器控制策略

压缩空气储能系统的调速系统主要由功频调节器与执行机构两部分构成[28]。其中，调速控制器由调差单元、死区单元、调节单元和继动单元组成，采用数字式实现；执行机构由高精度伺服电机和套筒式调节阀组成[29]。整个调速系统的模型框图如图 4 所示。其中，$R_{\mathrm{p}}$为下垂系数；死区单元可以避免执行机构的频繁调节，只有输入在死区阈值 $D_{\mathrm{z}}$ 之外时执行机构动作；调节单元采用 PI 控制器实现无差调节，$K_{\mathrm{g}}$ 和 $I_{\mathrm{g}}$ 分别为 PI 控制器的比例系数和积分系数；$T_{\mathrm{SR}}$为继动单元时间常数；$T_{\mathrm{sm}}$为伺服电机时间常数；$g$ 为阀门行程位置；$v_{\mathrm{gmax}}$和 $v_{\mathrm{gmin}}$分别为伺服电机调节转速上下限；$g_{\mathrm{max}}$和 $g_{\mathrm{min}}$分别为阀门行程位置上下限[30]。

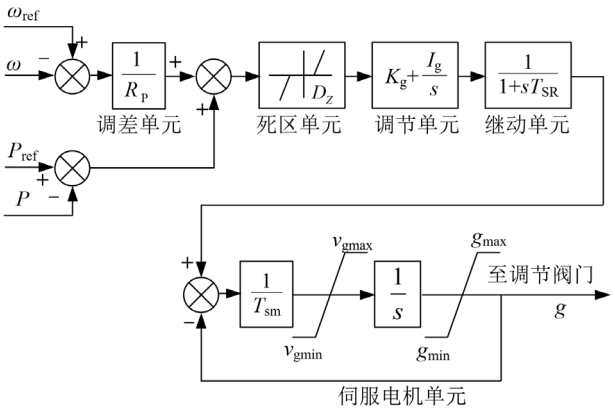



图 4　调速器控制策略传递函数框图

Fig.4　Transfer function block diagram of governor control strategy

## 3 仿真验证

为了验证所提的 DE-CAES 系统和转速-功率跟踪励磁控制策略的可行性与有效性，本文在 MATLAB/Simulink 中按图 1 搭建了 DE-CAES 发电系统仿真模型，同时参考文献[4]搭建了对应的传统 AA-CAES 的发电系统仿真模型，对两者进行仿真对比。两者膨胀部分相同，均为包含储气室和 4 级膨胀机的 AA-CAES 膨胀单元，每一级膨胀机前都接有换热器来对进入膨胀机的气体进行预热和级间加热，膨胀单元建模与参数设置参考文献[21]。CAES 膨胀机驱动透平发电机转子旋转，传统 AA-CAES 转子仅设置 $d$ 轴励磁绕组，励磁电压通过励磁变和整流器得到；DE-CAES 的发电机转子 $d$、$q$ 绕组分别连接到两个独立的整流器，$d$、$q$ 轴励磁电压经由励磁变和整流器得到，发电机定子绕组通过主变压器和输电线路连接到电网。输电线路、主变压器及 DESG 仿真参数见附录 A 表 A1—A3，仿真若无具体说明，均采用定电压的转速-功率跟踪励磁控制策略。

### 3.1 发电模式仿真

本部分对发电模式功率变化进行仿真，验证 DE-CAES 在发电时相对于传统 AA-CAES 的优势。仿真时间设置 150 s，过程中膨胀机功率参考值发生阶跃，设置 CAES 膨胀机初始功率为输出 0.6 pu，分别在 $t$ 取 40、80、120 s 时将膨胀机功率施加+0.2、+0.2 和−0.4 pu 的阶跃。膨胀释能功率、发电机转速和机端电压如图 5 所示，其中 $P_{mref}$ 为膨胀机功率参考值；$P_m$ 为 CAES 膨胀机释能功率。仿真特性指标对比见表 1，其中 $\Delta\omega_{max}$ 和 $\Delta U_{max}$ 为转速和机端电压的最大波动，发电模式仿真励磁电压如附录 B 图 B1 所示。

仿真结果图 5(b)显示 DE-CAES 的转速波动相对于传统 AA-CAES 大幅减小，表 1 显示在 40 s、80 s、120 s 时的转速波动相比传统 AA-CAES 分别下降了 83.5%、84.2%和 72.2%，同时恢复稳定时间更快，结果表明采用了转速 PI 控制的 DE-CAES 拥有更好的转速动态性能。图 5(c)中 DE-CAES 的电压波动较小且可以较快恢复稳定，表 1 显示在 40 s、80 s、120 s 时的机端电压波动相比传统 AA-CAES 分别下降了 90.8%、89.8%和 84.4%。上述仿真结果表明，DE-CAES 在发电运行状态有功阶跃变化过程中具备更高的转速动态性能和机端电压调节能力。

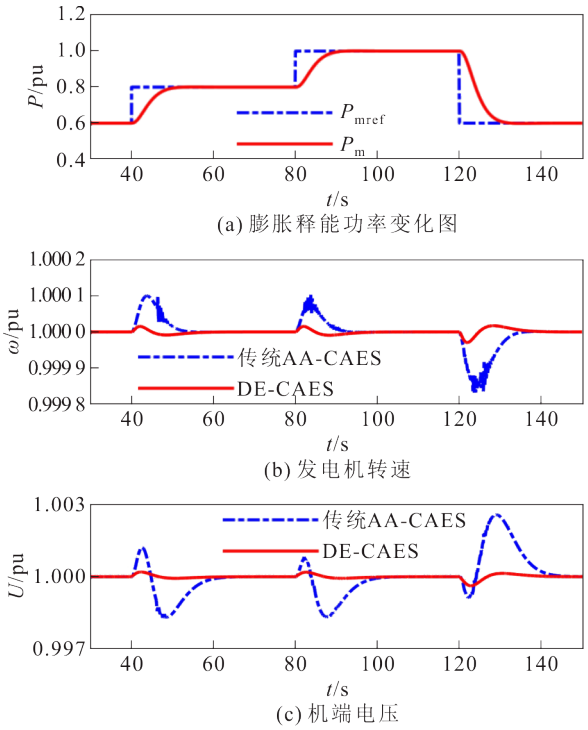



图 5 发电模式仿真图

Fig.5 Simulation diagram of power generation mode

表 1 发电模式仿真特性指标对比

Table 1 Comparison of simulation characteristic indicators for power generation modes

| 模型 | $\Delta\omega_{max}$/($10^{-4}$ pu) | $\Delta U_{max}$/($10^{-3}$ pu) | $\Delta\omega_{max}$/($10^{-4}$ pu) | $\Delta U_{max}$/($10^{-3}$ pu) | $\Delta\omega_{max}$/($10^{-4}$ pu) | $\Delta U_{max}$/($10^{-3}$ pu) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 40 s | | 80 s | | 120 s | |
| 传统 AA-CAES | 1.01 | 2.90 | 1.03 | 2.49 | 1.69 | 3.34 |
| DE-CAES | 0.167 | 0.265 | 0.163 | 0.254 | 0.470 | 0.522 |

### 3.2 调相模式仿真

#### 3.2.1 无功指令值阶跃仿真

为验证本文提出的 DE-CAES 的深度进相运行稳定性，本部分进行发电机无功指令值阶跃仿真，设置发电机工作于调相运行模式，DE-CAES 与传统 AA-CAES 采用相同的定无功控制策略，仿真时间设置 25 s，初始输出无功功率为 0.8 pu，在 8 s 时阶跃至 0 pu，在 13 s 时阶跃至−0.8 pu 的深度进相运行状态。两者机端电压、转速、输出有功功率和无功功率曲线如图 6 所示。

仿真结果图 6 显示，8 s 和 13 s 时无功阶跃后 DE-CAES 的转速和有功功率的波动相比传统 AA-CAES 更小，而两者无功功率和电压阶跃几乎重合，这是由于两者采用相同的定无功控制策略，

在无功阶跃时发电机功角从 0°阶跃至 180°，只发生了励磁电压的反转，而转子位置角几乎不变，此时 DE-CAES 有功通道对机端电压和无功功率的影响较小，因此这个结果合理的。

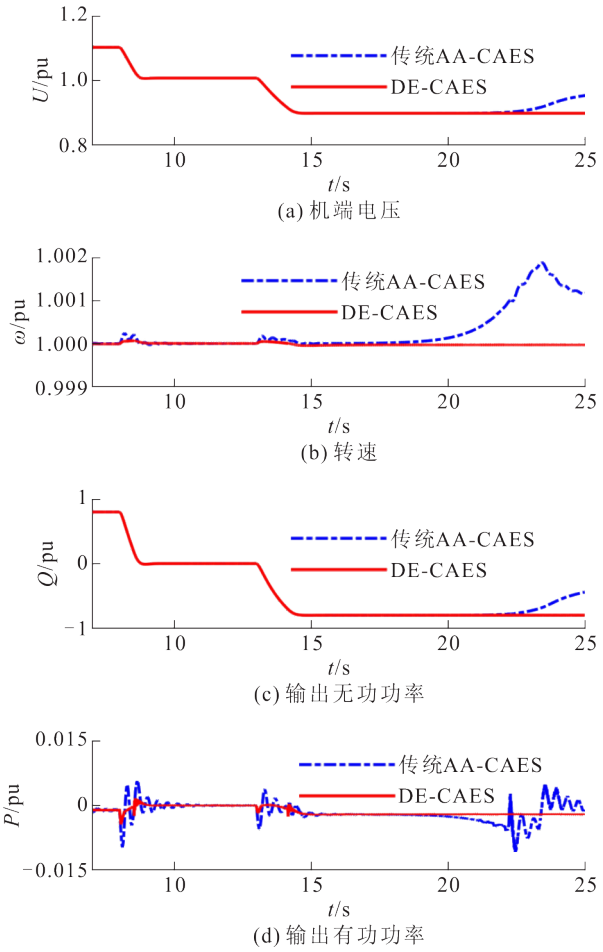



图 6　无功阶跃仿真图

Fig.6　Simulation diagram of reactive power step

两者的励磁电压波形图见附录 B 图 B2 所示，传统 AA-CAES 没有有功励磁通道，不具有深度进相稳定性，在 16 s 左右开始无法维持在深度进相运行状态，图 B2(c)中 DE-CAES 通过无功通道 $U_{fr}$ 维持机端电压稳定以及有功通道 $U_{fy}$ 的控制使转子位置角在阶跃过程中维持在 90°左右，此时 $U_{fq}$ 和 $U_{fd}$ 位置基本对应在有功通道和无功通道上，分别控制有功功率与无功功率，图 B2(b)中 $U_{fq}$ 通过有功通道对转速和输出有功功率的控制，可使 DE-CAES 在深度进相下保持稳定运行。结果表明 DE-CAES 依托 DESG 的双轴励磁绕组，在深度进相工况下具备更强的有功调控能力和深度进相稳定性，显著优于传统 AA-CAES。

### 3.2.2　短路故障仿真

本部分选取严重的三相短路故障进行仿真，研究对象为 DE-CAES 系统和传统 AA-CAES 系统的调相运行模式，验证本文提出的 DE-CAES 中双轴励磁同步发电机在调相模式下对电压调节能力和转子调节性能的提升效果。

仿真时间设置 5 s，在 2 s 时系统主变高压侧出现三相短路，短路持续时间 0.1 s。两者机端电压、转速、输出有功功率和无功功率曲线如图 7，三相短路时仿真特性指标对比见表 2，其中 $T_U$、$T_\omega$、$T_P$ 和 $T_Q$ 分别为电压、转速、输出有功和无功恢复时间；$\Delta P_{max}$ 为输出有功的最大波动。短路故障仿真励磁电压如附录 B 图 B3 所示。

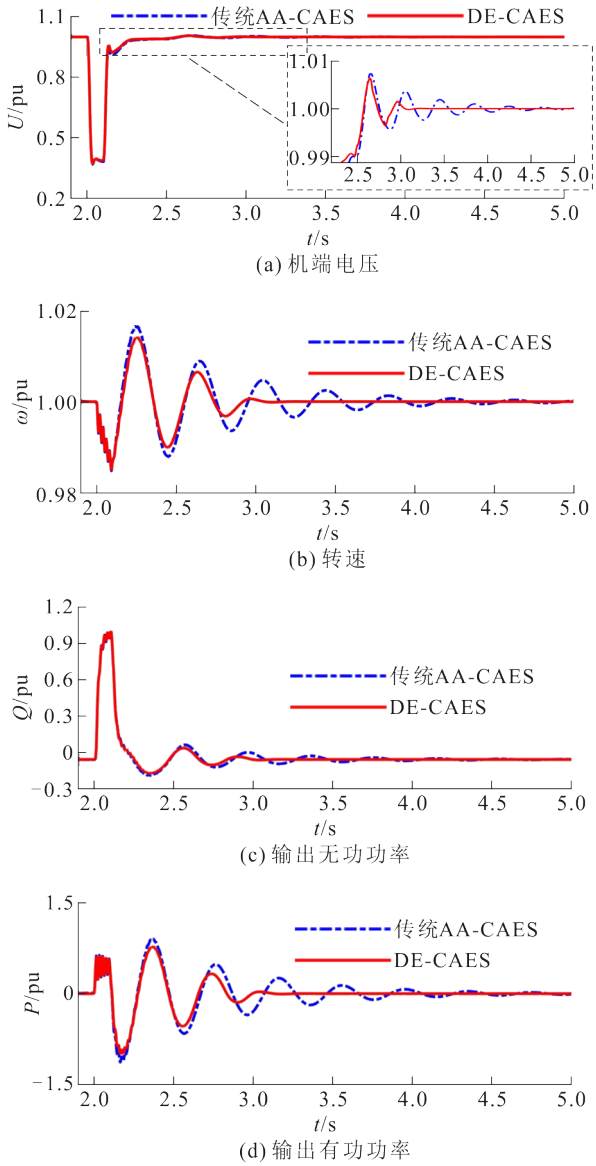



图 7　主变高压侧三相短路仿真图

Fig.7　Three-phase short-circuit simulation diagram at high voltage side of main transformer

表 2 三相短路时仿真特性指标对比

Table 2 Comparison of simulation characteristics in three-phase short circuit

| 模型 | $T_U$/s | $T_\omega$/s | $\Delta\omega_{max}$/pu | $T_P$/s | $\Delta P_{max}$/pu | $T_Q$/s |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 传统 AA-CAES | 3.38 | 2.63 | $3.18\times10^{-2}$ | 3.67 | 2.04 | 2.59 |
| DE-CAES | 1.28 | 1.12 | $2.92\times10^{-2}$ | 1.13 | 1.78 | 1.11 |

表 2 显示调相运行模式下出现三相故障时，DE-CAES 相比传统 AA-CAES 的机端电压恢复时间降低了 62.1%，同时转速、输出有功和输出无功的恢复时间分别降低了 57.4%、69.2%和 57.1%，转速和有功的振荡幅值减少 8.2%和 12.7%。仿真结果显示在严重故障时 DE-CAES 发电机的状态量的振荡幅值和振荡恢复时间优于传统 AA-CAES，具有更优的暂态稳定性以及更高的短路故障恢复能力。

### 3.3 模式切换仿真

本部分进行 DE-CAES 发电和调相工作模式切换的仿真，对采用现有的功率跟踪励磁控制策略的 DE-CAES 系统（设为功率跟踪 DE-CAES）和采用本文提出的转速-功率跟踪励磁控制策略的 DE-CAES 系统（设为转速-功率跟踪 DE-CAES）的仿真结果进行对比分析，验证本文的转速-功率跟踪励磁控制策略的控制效果。

仿真时间设置 80 s，过程中负荷功率发生扰动，设置 CAES 系统初始为调相运行模式，在 20 s 切换为输出 0.8 pu 有功功率的发电运行模式，再于 50 s 时切换回调相运行模式。膨胀释能功率、发电机转速、机端电压和输出无功功率如图 8 所示，模式切换仿真励磁电压如附录 B 图 B4 所示。

由励磁电压图B4可知DE-CAES的励磁电压相比 AA-CAES 更加稳定。这是因为 DE-CAES 存在有功控制通道，励磁电压与转子解耦。同时转速-功率跟踪DE-CAES由于有功通道加入了转速控制，进一步减小了转速的稳态误差，其 *dq* 轴励磁电压相比功率跟踪 DE-CAES 更稳定。

仿真结果图 8(b)显示 DE-CAES 的转速波动相对于传统 AA-CAES 大幅减小，而转速-功率跟踪 DE-CAES 相比功率跟踪 DE-CAES 的转速波动更小，平均降低了 74.0%，同时消除了功率跟踪 DE-CAES 的转速稳态偏差。图 8(c)中 DE-CAES 的电压波动相对于传统 AA-CAES 同样大幅减小，而转速-功率跟踪 DE-CAES 相比功率跟踪 DE-CAES 的电压波动平均减小了 26.2%。结果表明本文提出

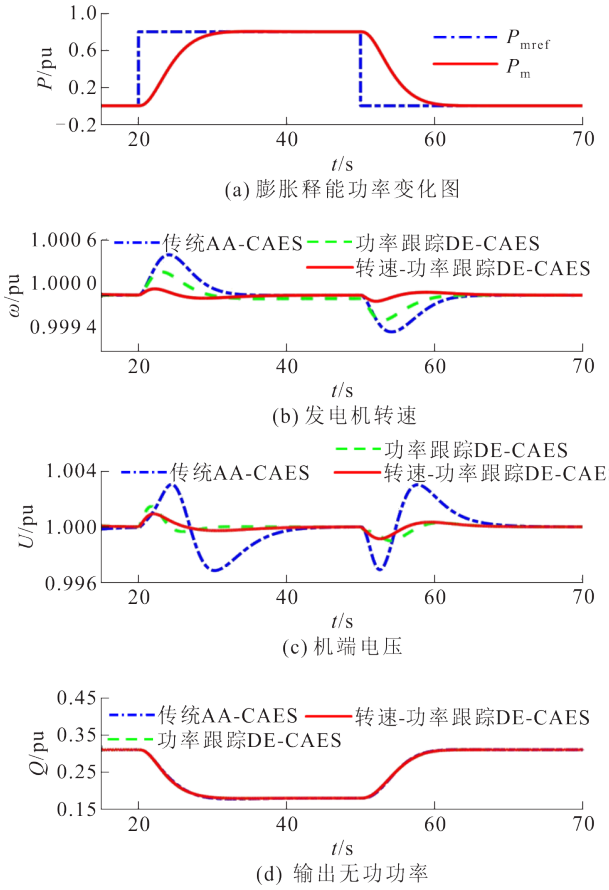



图 8 模式切换仿真图

Fig.8 Simulation diagram of mode switching

的 DESG 的转速-功率跟踪励磁控制策略在应用于 DE-CAES 系统时，相较于功率跟踪励磁控制策略，具备更高的转速与电压的调节能力，从而加快了发电与调相模式切换的过程，进一步提升 CAES 不同工况切换和应对电网较大波动下的系统动态性能，满足电网对 CAES 系统灵活响应的需求。

为直观对比不同运行工况下系统的响应特性，对发电模式仿真、三相短路仿真与模式切换仿真的电压与转速扰动幅值及恢复时间进行了汇总，见附录 A 表 A4 所示。

## 4 结论

本文提出了一种基于双轴励磁同步机组的先进绝热压缩空气储能系统（DE-CAES）并设计了对应的转速-功率跟踪励磁控制策略，在 MATLAB/Simulink 仿真平台进行了发电模式、调相模式和模式切换下的仿真，主要结论如下：

1）本文提出的 DE-CAES 系统，通过 DESG 与 AA-CAES 的深度融合，相较于传统 AA-CAES，在

发电功率阶跃、调相模式深度进相及电网短路故障等场景中，转速与机端电压波动显著降低，暂态调节能力与故障恢复速度有明显提升，为电力系统提供更可靠的电压支撑与稳定保障。

2）配套设计的转速-功率跟踪励磁控制策略，有效抑制DESG模式切换中的状态量波动并具备更快的运行模式切换速度，同时通过微分与滤波系数解耦设计及微分模型的等效，提升了参数整定的便捷性与控制鲁棒性并减少计算资源消耗。

本文仅在理论层面进行研究，而在工程应用中，DE-CAES 需关注机组容量配置与运行约束问题，包括合理匹配DESG额定容量与CAES释能功率水平，以及在深度进相运行工况下，应考虑转子热稳定性及功角安全裕度等因素，合理设定进相无功运行边界。同时，DE-CAES可与SVG、STATCOM及同步调相机等无功电源进行协同控制与分层调节，以提升电网无功资源整体利用效率与调节效果。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

## 参考文献　References


[1] 李广阔，陈来军，谢毓广，等. 考虑压缩空气储能变工况特性的风储联合系统运行优化策略[J]. 高电压技术，2020，46(2)：511-518.
LI Guangkuo, CHEN Laijun, XIE Yuguang, et al. Coordinated optimization strategies of wind-storage hybrid system considering off-design characteristics of compressed air energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 511-518.

[2] 魏林君，叶　华，迟永宁. 基于状态重构的构网型风机与储能系统联合频率支撑控制策略[J]. 高电压技术，2023，49(12)：5095-5104.
WEI Linjun, YE Hua, CHI Yongning. Frequency response coordinated control strategy between grid-forming wind turbine and energy storage based on state reconstruction[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(12): 5095-5104.

[3] 李更丰，孙少华，别朝红，等. 面向新型电力系统弹性提升的储能优化配置与灵活调度研究综述[J]. 高电压技术，2023，49(10)：4084-4095.
LI Gengfeng, SUN Shaohua, BIE Zhaohong, et al. Review on optimal configuration and flexible scheduling research of energy storage for resilience improvement of new power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4084-4095.

[4] 王丹，张甜甜，吴嘉禾，等. 大规模压缩空气储能系统发电方式与运行控制分析与构想[J]. 电力系统自动化，2019，43(24)：13-22.
WANG Dan, ZHANG Tiantian, WU Jiahe, et al. Analysis and conception of power generation mode and operation control of large-scale compressed air energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 13-22.

[5] 王佳旭，苗世洪，王廷涛，等. 考虑调峰-备用-爬坡-惯量多应用价值的大规模先进压缩空气储能多阶段优化规划[J]. 高电压技术，2025，51(3)：1339-1354.
WANG Jiaxu, MIAO Shihong, WANG Tingtao, et al. Multi-stage optimization planning of large-scale A-CAES with consideration of multi-application values including peak regulation, backup, ramping and inertia[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 1339-1354.

[6] 赵波，林达，陈哲，等. 面向新能源消纳的长短周期混合储能关键技术及展望[J]. 新型电力系统，2024，2(2)：162-178.
ZHAO Bo, LIN Da, CHEN Zhe, et al. Key technologies and prospects of long-short-cycle hybrid energy storage for renewable energy consumption[J]. New Type Power Systems, 2024, 2(2): 162-178.

[7] 李广阔，陈来军，郑天文，等. 压缩空气储能系统调相运行模式初探[J]. 全球能源互联网，2018，1(3)：348-354.
LI Guangkuo, CHEN Laijun, ZHENG Tianwen, et al. Preliminary investigation on operation mode of compressed air energy storage system as synchronous condenser[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(3): 348-354.

[8] 李广阔，王国华，薛小代，等. 金坛盐穴压缩空气储能电站调相模式设计与分析[J]. 电力系统自动化，2021，45(19)：91-99.
LI Guangkuo, WANG Guohua, XUE Xiaodai, et al. Design and analysis of condenser mode for Jintan salt cavern compressed air energy storage plant of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 91-99.

[9] 韩居华，张桂娥. 双轴励磁同步发电机研究综述[J]. 华北电力技术，1991(12)：30-33.
HAN Juhua, ZHANG Gui'e. A review of research on dual axis excitation synchronous generators[J]. North China Electric Power, 1991(12): 30-33.

[10] 许国瑞，傅悦，张建承. 转子阻尼结构对双轴励磁发电机功率跟踪励磁控制特性的影响[J]. 中国电机工程学报，2025，45(3)：1137-1147.
XU Guorui, FU Yue, ZHANG Jiancheng. Influence of rotor damping structures on power tracking excitation control characteristics of dual-excited synchronous generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(3): 1137-1147.

[11] 许国瑞，李乾伟，孙富珂. 基于双轴励磁电机新型潮流控制器拓扑结构及控制策略[J/OL]. 华北电力大学学报(自然科学版)，2024：1-9[2025-05-25]. https://link.cnki.net/urlid/13.1212.TM.20241108.1325.002.
XU Guorui, LI Qianwei, SUN Fuke. New topology structure and control strategy of power flow controller based on dual axis excitation motor[J/OL]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2024: 1-9[205-05-25]. https: //link. cnki. net/urlid/13.1212. TM. 20241108.1325.002.

[12] REDDY A A, BHAT S S. Modeling of dual excited synchronous generator with slip frequency excitation[C]//Proceedings of 2020 IEEE First International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC). Nagpur, India: IEEE, 2020: 1-3.

[13] YASSIN H M, ABDEL-WAHAB R R, HANAFY H H. Active and reactive power control for dual excited synchronous generator in wind applications[J]. IEEE Access, 2022, 10: 29172-29182.

[14] 田烨杰，李啸骢，陈新，等. 我国双轴励磁电机的研究状况概述[J]. 电气开关，2019，57(6)：1-3.
TIAN Yejie, LI Xiaocong, CHEN Xin, et al. Summary of research conditions on double-shaft exciting motor for our country[J]. Electric Switcher, 2019, 57(6): 1-3.

[15] 黄健，涂光瑜，陈德树. 双轴励磁同步发电机的微分反馈非线性最优励磁控制[J]. 中国电机工程学报，1996，16(5)：341-345，365.
HUANG Jian, TU Guangyu, CHEN Deshu. Derivation-feedback nonlinear optimal excitation control of dual-excited synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(5): 341-345, 365.

[16] 杨顺昌，廖勇，李辉，等. 异步化同步发电机[M]. 北京：科学出版社，2009：20-30.
YANG Shunchang, LIAO Yong, LI Hui, et al. Asynchronous synchro-

nous generator[M]. Beijing, China: Science Press, 2009: 20-30.

[17] 刘滢君. 双轴全控器件励磁同步调相机控制策略[D]. 武汉：华中科技大学，2024.
LIU Yingjun. Control strategy for dual-axis synchronous condenser based on an excitation system with full-controlled devices[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2024.

[18] 许国瑞，王珍珍，李伟力. 双轴励磁发电机功率跟踪励磁控制系统研究[J]. 电力自动化设备，2022，42(6)：192-198.
XU Guorui, WANG Zhenzhen, LI Weili. Research on power tracking excitation control system of dual-excited synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(6): 192-198.

[19] 韩中合，郭森闯. AA-CAES 系统释能过程运行特性分析[J]. 太阳能学报，2020，41(1)：295-301.
HAN Zhonghe, GUO Senchuang. Analysis of operation characteristics on discharge process of AA-CAES system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(1): 295-301.

[20] 崔森，陈来军，陈思源，等. 基于最优动态功率补偿的先进绝热压缩空气储能一次调频控制策略[J]. 高电压技术，2024，50(6)：2433-2441.
CUI Sen, CHEN Laijun, CHEN Siyuan, et al. Primary frequency modulation control of advanced adiabatic compressed air energy storage based on optimal dynamic power compensation[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2433-2441.

[21] 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 Cheng. Modelling, simulation and characteristic analysis of compressed air energy storage system[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2020.

[22] 钟后鸿，李志强，肖洋，等. 双轴励磁调相机的电磁设计研究[J]. 大电机技术，2022(6)：7-13，85.
ZHONG Houhong, LI Zhiqiang, XIAO Yang, et al. Electromagnetic design of dual-excited synchronous condenser[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2022(6): 7-13, 85.

[23] REDDY A A, BHAT S S, UGALE R T. Design and FEM analysis of dual excited synchronous generator[C]//Proceedings of 2017 National Power Electronics Conference. Pune, India: IEEE, 2017: 302-306.

[24] XU G R, WANG Z Z, LIU B C, et al. Finite-element calculation of electromagnetic characteristics and steady-state stability of dual-excited synchronous generator[J]. IET Electric Power Applications, 2021, 15(10): 1300-1313.

[25] 常鲜戎，颜湘武，潘云江，等. 使用双励机提高远距离输电线路的稳定性[J]. 中国电机工程学报，1994，14(5)：38-44.
CHANG Xianrong, YAN Xiangwu, PAN Yunjiang, et al. Using dual-excited synchronous generators for improving long distance transmission stability[J]. Proceedings of The CSEE, 1994, 14(5): 38-44.

[26] 罗超龙，黄金军，许国瑞，等. 双轴励磁调相机励磁绕组的优化设计[J]. 大电机技术，2020(1)：32-37，83.
LUO Chaolong, HUANG Jinjun, XU Guorui, et al. Optimal design of field winding of dual-excited synchronous condenser[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2020(1): 32-37, 83.

[27] AGARWAL H C, KAPOOR S C. Power system dynamic studies for improved stability and minimum rotor heating via graph-theoretic modelling of a dual-excited synchronous generator[J]. IIEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1975, 94(2): 177-186.

[28] CALERO I, CAÑIZARES C A, BHATTACHARYA K. Impact of mechanical system modeling on compressed air energy storage models for frequency regulation[C]//Proceedings of 2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Atlanta, USA: IEEE, 2019: 1-5.

[29] WEN X K, LI Q M, ZHONG J L, et al. Research on selection of servo control system for compressed air energy storage[C]//Proceedings of 2018 3rd International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE). Huhhot, China: IEEE, 2018: 121-125.

[30] 刘迪. 压缩空气储能系统轴系建模与振荡分析[D]. 武汉：华中科技大学，2020.
LIU Di. Shaft modeling and oscillation analysis of compressed air energy storage system[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2020.



**唐梓睿**
2002—，男，硕士生
主要从事电力系统运行与控制方面的研究工作
E-mail: ziruit@hust.edu.cn

TANG Zirui



**王　丹**(通信作者)
1977—，男，博士，教授，博导
主要从事电力系统运行与控制、大功率电力电子技术在电力系统中应用方面的研究工作
E-mail: wangdan@mail.hust.edu.cn

WANG Dan
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2025-11-19　在线出版日期　2026-03-16　　编辑　陈　蔓

## 附录 A

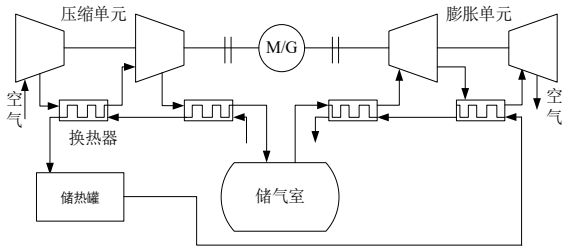



图 A1　压缩空气储能系统原理图

Fig.A1　Schematic diagram of CAES

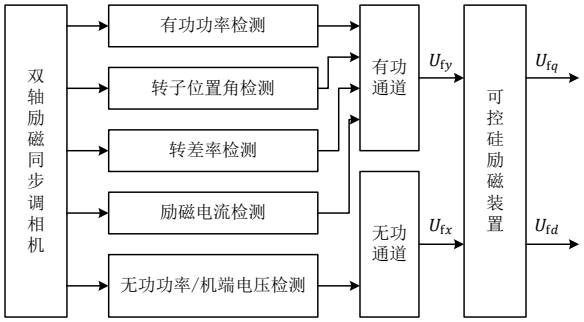



图 A2　双通道励磁控制框图

Fig.A2　Block diagram of dual-channel excitation control

DESG 转子运动方程：

$$\begin{cases} H\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=T_{\mathrm{m}}-T_{\mathrm{e}} \\ \dfrac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}=\omega-1 \end{cases} \tag{A1}$$

式中：$H$ 为转动惯量；$\theta$ 为转子位置角；$T_{\mathrm{m}}$ 为机械转矩；$T_{\mathrm{e}}$ 为电磁转矩。

$$T_{\mathrm{e}}=i_q\varphi_d-i_d\varphi_q \tag{A2}$$

式中：$\varphi_d$ 和 $\varphi_q$ 分别为 $dq$ 轴绕组磁链。

DESG 功率方程：

双轴励磁同步发电机输出有功 $P$ 和输出无功 $Q$ 的方程为式(A3)和(A4)：

$$P=u_di_d+u_qi_q \tag{A3}$$

$$Q=u_qi_d-u_di_q \tag{A4}$$

表 A1、A2 和 A3 中使用的仿真模型参数分别来源于文献[A1-A3]。

表 A1　输电线路参数

Table A1　Transmission line parameters

| 线路长度/km | 电阻/(Ω·km$^{-1}$) | 电抗/(Ω·km$^{-1}$) | 电容/(μF·km$^{-1}$) | 电阻/(Ω·km$^{-1}$) | 电抗/(Ω·km$^{-1}$) | 电容/(μF·km$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 正序参数 | | | 负序参数 | | |
| 150 | 0.010 7 | 0.116 6 | 0.197 8 | 0.094 1 | 0.068 1 | 0.197 8 |

表 A2　变压器参数

Table A2　Transformer parameters

| 参数 | 额定容量/MVA | 高压/kV | 低压/kV | 联结组标号 | 空载损耗/kW | 负载损耗/kW | 空载电流/% | 短路阻抗/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 数值 | 370 | 525 | 20 | YNd11 | 170 | 900 | 0.15 | 14 |

表 A3　DESG 参数

Table A3　Parameters of DESG

| 发电机参数 | $x_{ad}$ | $x_{aq}$ | $x_d$ | $x_q$ | $x_{fd}$ | $x_{fq}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 数值/pu | 1.268 7 | 1.268 7 | 1.358 | 1.358 | 1.335 4 | 1.335 4 |
| 发电机参数 | $x_{\mathrm{D}}$ | $x_{\mathrm{Q}}$ | $r_{\mathrm{D}}$ | $r_{\mathrm{Q}}$ | $r_{fd}$ | $r_{fq}$ |
| 数值/pu | 1.304 6 | 1.304 6 | 0.002 3 | 0.002 3 | 0.000 416 | 0.000 416 |
| 发电机基准值 | $S_{\mathrm{b}}$/MVA | $U_{\mathrm{b}}$/kV | $I_{\mathrm{b}}$/kA | $\Omega_{\mathrm{b}}$/(rad/s) | | |
| 数值 | 300 | 20 | 8.66 | 314.16 | | |

表 A4　仿真工况对比说明表

Table A4　Comparison of simulation conditions

| 仿真工况 | 仿真模型 | $\Delta\omega_{\max}$/pu | $T_\omega$/s | $\Delta U_{\max}$/pu | $T_{\mathrm{U}}$/s |
|---|---|---|---|---|---|
| 发电模式仿真 | 传统 AA-CAES | $1.24\times10^{-3}$ | 15.97 | $2.91\times10^{-3}$ | 19.64 |
| | DE-CAES | $2.67\times10^{-5}$ | 12.84 | $3.47\times10^{-4}$ | 8.47 |
| 三相短路仿真 | 传统 AA-CAES | $3.18\times10^{-2}$ | 2.63 | — | 3.38 |
| | DE-CAES | $2.92\times10^{-2}$ | 1.12 | — | 1.28 |
| 模式切换仿真 | 传统 AA-CAES | $4.10\times10^{-4}$ | 18.5 | $6.19\times10^{-3}$ | 23.64 |
| | 功率跟踪 DE-CAES | $2.86\times10^{-4}$ | 12.93 | $1.63\times10^{-4}$ | 14.63 |
| | 转速-功率跟踪 DE-CAES | $7.44\times10^{-5}$ | 13.05 | $1.20\times10^{-3}$ | 15.35 |

注：表 A4 中仿真数据为工况下所有阶跃的平均值，各仿真工况均基于相同的系统参数与初始运行状态设置，以保证不同控制策略和运行模式下仿真结果的可比性。


[A1] IVANOV I E，UMNOV Y A，LACHUGIN V F. Parameter estimation for a 500 kV overhead transmission line and analysis of dead time prior to single-phase automatic reclosing based on synchrophasor measurements[J]. Power Technology and Engineering, 2024, 58(1): 169-179.

[A2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 油浸式电力变压器技术参数和要求：GB/T 6451—2015[S]. 北京：中国标准出版社，2015.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specification and technical requirements for oil-immersd power transformers: GB/T 6451—2015[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2015.

[A3] 胡一平. 双轴励磁汽轮发电机暂稳态参数的计算与分析[D]. 北京：华北电力大学(北京)，2019.
HU Yiping. Calculation and analysis of transient- and steady-state parameters of dual excited turbo-generator[D]. Beijing, China: North China Electric Power University (Beijing), 2019.

## 附录 B

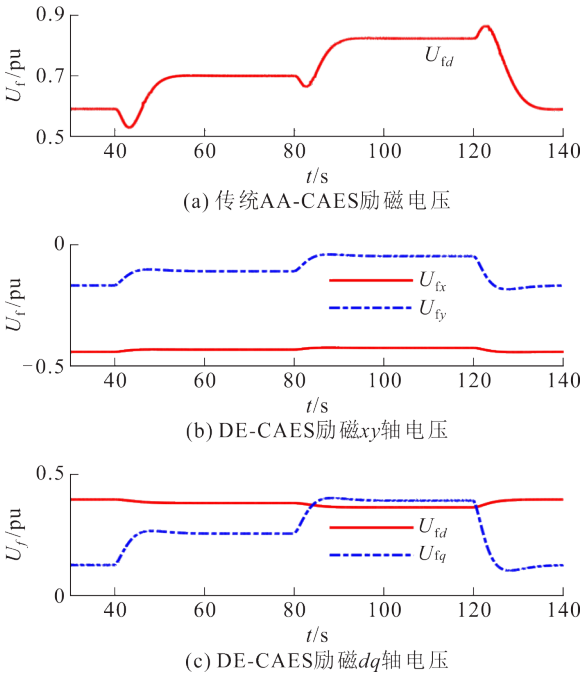



图 B1　发电模式仿真励磁电压图

Fig.B1　Excitation voltage diagram of power generation mode simulation

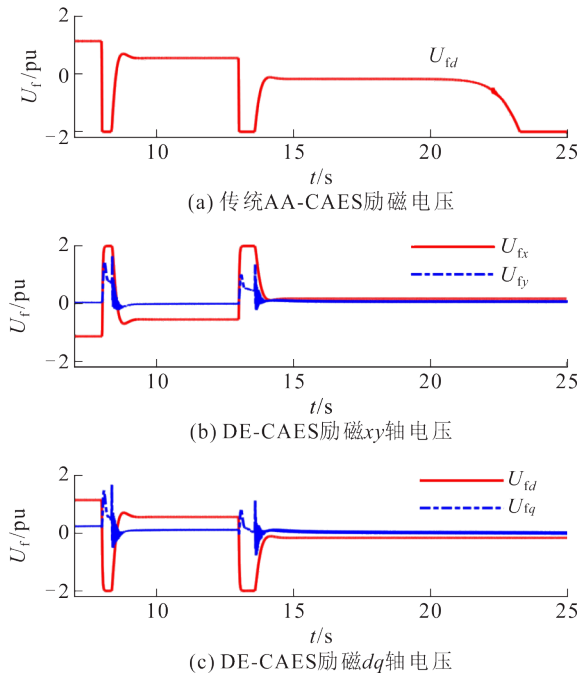



图 B2　无功阶跃仿真励磁电压图

Fig.B2　Excitation voltage diagram of reactive power step simulation

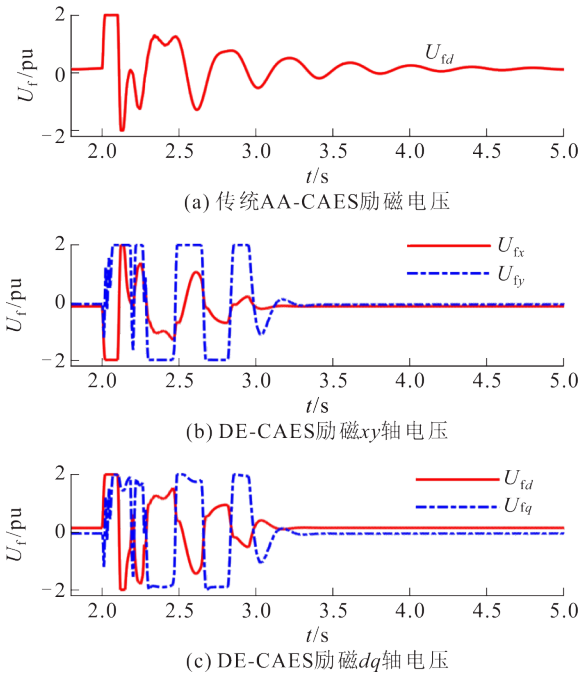
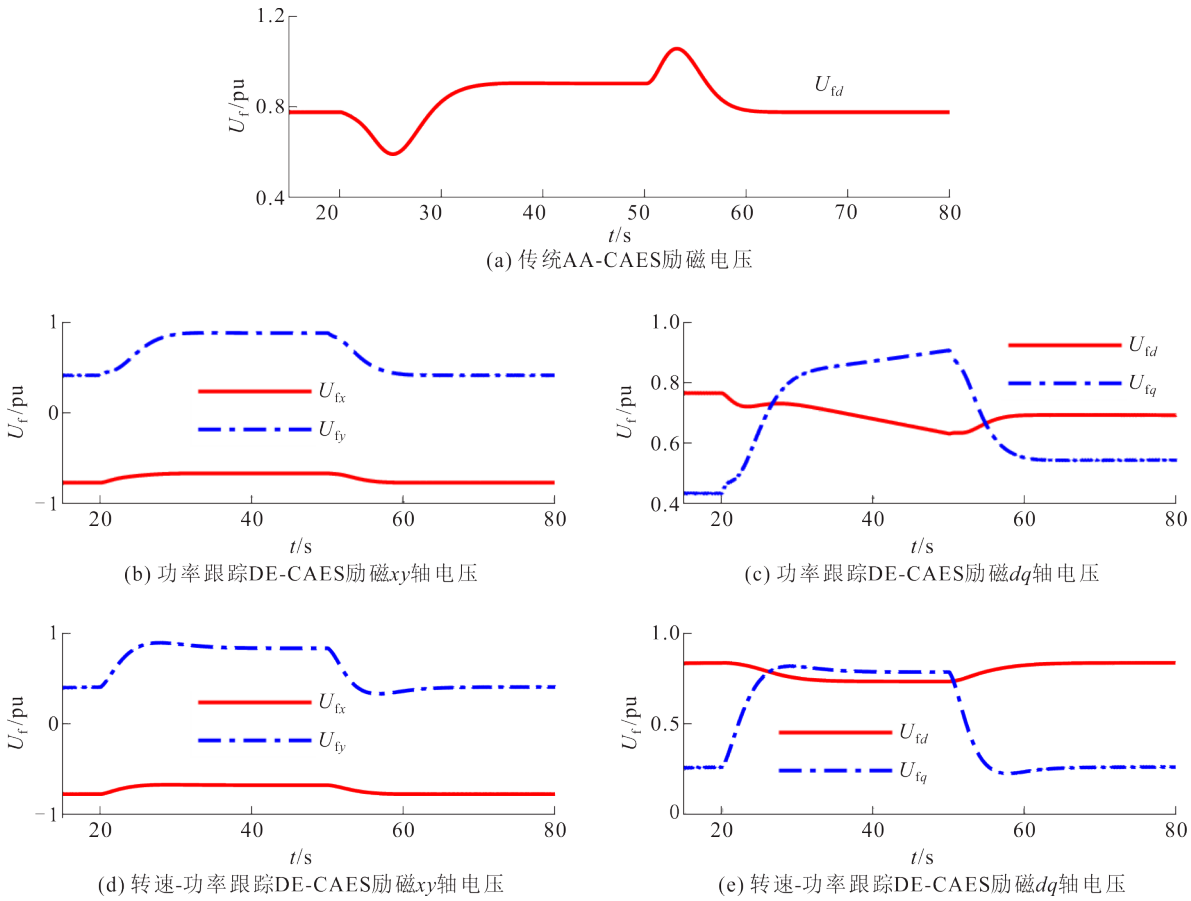



图 B3　三相短路仿真励磁电压图

Fig.B3　Excitation voltage diagram of three phase short circuit simulation




(a) 传统AA-CAES励磁电压

(b) 功率跟踪DE-CAES励磁$xy$轴电压

(c) 功率跟踪DE-CAES励磁$dq$轴电压

(d) 转速-功率跟踪DE-CAES励磁$xy$轴电压

(e) 转速-功率跟踪DE-CAES励磁$dq$轴电压

图 B4　模式切换仿真励磁电压图

Fig.B4　Excitation voltage diagram of mode switching simulation