DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.5.120 **中图分类号**：TM619 **文献标志码**：A

带宽参数自适应调整的压缩空气储能线性自抗扰平滑并网控制策略

孟建辉[1]，孙亚鑫[1]，张自力[2]，王晨雨[1]
(1.新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学)，保定 071003；2.国网河北省电力有限公司邯郸供电公司，邯郸 056035)

摘要：压缩空气储能CAES(compressed air energy storage)作为一种具有较大发展潜力的储能技术，具有规模大、寿命长、环保等优点。但由于其容量较大，因此在接入电网时，如果不满足电压相位、幅值、频率均与电网相同的条件，就会出现并网冲击电流过大威胁电力系统安全稳定运行的问题。为此，在相比于传统比例积分 PI(proportional intergral)控制更为精确的线性自抗扰控制 LADRC(linear active disturbance rejection control)的基础上，提出了一种带宽参数可以自适应调整的 LADRC 策略自适应线性自抗扰控制 A-LADRC(adaptive linear active disturbance rejection control)以实现平滑并网。最后通过仿真实验和硬件在环实验对所提控制策略进行了验证，并选取了合适的调节参数，结果表明，所提自适应控制策略能够有效减小并网冲击，实现平滑并网，为CAES安全接入电网提供了新的解决方案。

关键词：压缩空气储能；线性自抗扰控制；带宽参数自适应调节；平滑并网；冲击电流

Linear Active Disturbance Rejection Smooth Grid-connected Control Strategy for Compressed Air Energy Storage with Adaptive Adjustment of Bandwidth Parameters

MENG Jianhui[1], SUN Yaxin[1], ZHANG Zili[2], WANG Chenyu[1]
(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Baoding 071003, China; 2. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Handan Power Supply Company, Handan 056035, China)

Abstract: Compressed air energy storage (CAES), as an energy storage technology with great development potential, has the advantages of large scale, long life and environmental protection. However, due to its large capacity, if the voltage phase amplitude and frequency are not the same as those of the power grid when it is connected to the power grid, there will be a problem that the grid-connection impulse current is too large and threatens the safe and stable operation of the power system. Therefore, based on linear active disturbance rejection control (LADRC), which is more accurate than traditional PI control, a linear active disturbance rejection control strategy with adaptive adjustment of bandwidth parameters is proposed to achieve smooth grid connection. Finally, the proposed control strategy is verified by simulation experiment and hardware-in-the-loop experiments, and appropriate adjustment parameters are selected. The results show that the proposed adaptive control strategy can effectively reduce the impact of grid-connection and achieve smooth grid-connection, providing a new solution for the safe access of compressed air energy storage to the grid.

Keywords: Compressed air energy storage; linear active disturbance rejection control; adaptive adjustment of bandwidth parameters; smooth grid-connection; impulse current

收稿日期：2024-05-17；**修回日期**：2024-06-22；**录用日期**：2024-07-04；**网络首发日期**：2024-07-29
基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2023MS105)
This work is supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities under the grant of 2023MS105

压缩空气储能 CAES(compressed air energy storage)由于具有发电规模大、使用寿命长及稳定性较高等优点，正在受到日益广泛的研究，同时其储能量级和响应速度也较为出色，具有较大的

发展潜力[1-2]。在参与电网调节应用方面，CAES 可以平抑新能源发电功率的波动，进行削峰填谷及提供电压和频率支撑[3-4]。为了减小 CAES 接入电网产生的冲击电流，需要平滑并网控制策略保证 CAES 平稳接入电网。针对平滑切换，文献[5-6]为了实现虚拟同步发电机控制方式向定功率控制方式的平滑切换，通过电流环控制指令维持了切换前后内环参数的一致，减小了控制模式切换时产生的冲击；文献[7]在由光伏和储能组成的系统切换成并网模式运行时，采取了模型预测控制，并在传统模型预测控制的基础上引入了加权系数进行自适应调整，较好地减小了因电压匹配精确度不足而引起的冲击；文献[8]为了实现运行模式的平滑切换，在常规下垂控制的基础上加入了扰动观测，能够快速跟踪电流的波动，并通过调节器减小切换过程中的电流变化；文献[9]采用一种改进线性二次调节器减小微电网运行模式切换过程中的参数变化，实现了微电网在并网和孤岛之间的平滑切换。目前平滑切换的研究主要集中在微电网，针对 CAES 平滑并网的问题鲜有研究，CAES 接入电网的本质是同步发电机接入电网，现阶段多采用准同期并网，即把发电机调整到并网的条件，然后投入电网。文献[10]通过估计转子初始位置确定初始角度，然后控制 *dq* 轴调整定子电压的大小和相位与电网同步，完成发电机的平滑并网；文献[11]对发电机输出相位进行比例积分 PI(proporlional intergral)调节，同时将角频率和相位调节进行协同控制，选择合适的 PI 调节器参数，完成了发电机与电网相位和频率的同步。

自抗扰控制 ADRC(active disturbance rejection control)是在现代控制理论的基础上，基于对比例积分微分 PID(proportional intergral derivative)控制器本质的分析、改进而提出的一种控制方法[12]。文献[13]为了提高直流母线电压的稳定性，对线性扩展状态观测器进行了改进，提高了各个状态变量的跟踪精度，优化了整个系统的动态响应；文献[14]设计了一种双向 DC-DC 变换器 ADRC 策略，并结合模糊神经网络实现了控制器的在线优化和参数的灵活调整；文献[15]针对视觉伺服系统，在传统 LADRC 的基础上引入了模糊控制算法，提升了对指令的反馈速度，增强了抗干扰能力；文献[16]提出一种改进线性扩张状态观测器的 ADRC 宽频振荡抑制方法，在传统一阶自抗扰控制器中增添比例支路和滤波环节，增强了自抗扰逆变器鲁棒性；文献[17]利用线性自抗扰控制 LADRC(linear active disturbance rejection control)改进了双直线电机交叉耦合控制算法结构，实现了高精度控制，减小了双直线电机之间的同步误差。以上文献中，ADRC 技术的优势得到了充分验证，但其控制器的参数固定使得控制效果在动态系统中存在一定的局限性，因此研究具备自适应调节能力的 LADRC 具有实际意义。

为了使 CAES 平滑接入电网，本文采用精确度更高和响应速度更快的 LADRC 策略对并网预同步进行控制。首先对 CAES 系统进行数学建模；然后分析了 LADRC 方法，在传统控制器的基础上对带宽参数进行自适应调整，对所提自适应控制策略进行了稳定性分析；最后通过仿真和硬件在环实验验证了自适应线性自抗扰控制 A-LADRC(adaptive linear active dis- turbance rejection control)策略在减小并网冲击方面的有效性。

1　CAES 系统结构与建模

现阶段常用的蓄电池属于化学储能形式，多采用等效电路模型来描述其动态外特性，而 CAES 属于物理储能形式，由多个装置共同构成，相比于电化学储能具有规模大、寿命长、安全稳定等优点。在对储能的控制方面，蓄电池一般对换流器采用定功率控制模式或直流电压控制，而 CAES 系统无换流器装置，通过同步发电机接入电网，因此可以通过控制储气库的阀门来控制释放的空气质量流量进而控制 CAES 的输出功率。本节通过对 CAES 的结构及各环节装置的数学模型进行分析，阐明 CAES 的工作原理，为后文的控制策略设计提供理论依据。

1.1 CAES 系统的结构

本文搭建了非补燃式 CAES 系统，系统的拓扑结构如图 1 所示。该系统主要包括电动机、高压和低压 2 级压缩机、储气库、高压和低压 2 级透平、发电机、高温和低温储热罐及换热器。用电低谷期时，富余风电驱动压缩机经过 2 级压缩将空气压缩并储存在储气库中。用电高峰时段，储气库根据控制需求控制阀门释放高压空气，高压空气依次经过两级透平，驱动发电机组完成发电。在空气压缩阶段，高温高压空气与换热器中导热油进行换热，导热油吸热升温后进入高温导热油罐；在空气释放阶段，高温储热罐中的导热油进入换热器对空气进行加热[18]。

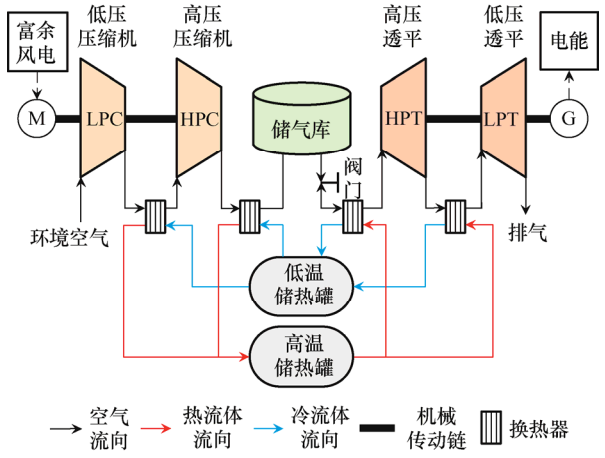


图 1 非补燃式 CAES 系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of non-complementary firing CAES system

1.2 CAES 系统的数学模型

依据 CAES 系统中各环节所涉及装置的基本原理，在合理的简化条件下，建立了先进绝热 CAES 系统运行各环节的数学模型[19-20]。

1.2.1 压缩机

忽略压缩机内部气体容积且假设内部没有抽气放气，忽略压缩机内流体流动的影响及与外界环境的热量交换，则第 i 级压缩机出口空气温度 $T_{c,i}^{out}$ 可表示为

$$T_{c,i}^{out}=T_{c,i}^{in}\left[1+\frac{1}{\eta_{c,i}}\left(\beta_{c,i}^{\frac{K-1}{K}}-1\right)\right] \tag{1}$$

式中：$T_{c,i}^{in}$、$\eta_{c,i}$、$\beta_{c,i}$ 分别为第 i 级压缩机的入口空气温度、绝热效率和压缩机单级压比；K 为空气比热容比。

储能阶段压缩机消耗的总功 W_c 为

$$W_c=\sum_{i=1}^{n}c_{pa}m_{a,c}t_s(T_{c,i}^{out}-T_{c,i}^{in}) \tag{2}$$

式中：c_{pa} 为压缩机中空气定压比热容；$m_{a,c}$ 为压缩机中的空气质量流量；t_s 为储能时长；n 为压缩机级数。

1.2.2 透平机

透平机的运行机理可以理解为压缩机的逆过程。第 i 级透平机的出口空气温度 $T_{t,i}^{out}$ 为

$$T_{t,i}^{out}=T_{t,i}^{in}\left[1-\eta_{t,i}\left(1-\beta_{t,i}^{\frac{1-k}{k}}\right)\right] \tag{3}$$

式中，$T_{t,i}^{in}$、$\eta_{t,i}$、$\beta_{t,i}$ 分别为第 i 级透平机的入口空气温度、绝热效率和膨胀比。

释能阶段总的透平机做功 W_t 为

$$W_t=\sum_{i=1}^{m}c_{pa}m_{a,t}t_r(T_{t,i}^{in}-T_{t,i}^{out}) \tag{4}$$

式中：$m_{a,t}$ 为透平机中空气质量流量；t_r 为释能时长；m 为透平机级数。

1.2.3 换热器

假设气体为理想气体，忽略流体在流动和换热过程中的化学反应和热量损失，则换热器出口空气温度 $T_{a,i}^{out}$ 为

$$T_{a,i}^{out}=(1-\varepsilon)T_{a,i}^{in}+\varepsilon T_{o,i}^{in} \tag{5}$$

式中：$T_{a,i}^{in}$、$T_{o,i}^{in}$ 为空气入口温度和载热介质的入口温度；ε为换热能效。

压缩气体过程中，储热器中存储的热量 Q_s 为

$$Q_s=\sum_{i=1}^{n}t_s m_a c_{pa}(T_{a,i}^{in}-T_{a,i}^{out}) \tag{6}$$

式中，m_a 为空气质量。

1.2.4 储气室

假设储气室储存高压气体的过程为定容过程，储能过程和释能过程不同时进行，重点研究储气室内压力和温度的变化。储能阶段储气室内空气压强和温度的变化趋势可表示为

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t}=\dfrac{c_{pa}T_{in}m_{in}+h_{ac}A_c(T_{ac}-T)}{Vc_v}R_g\\[2ex]\dfrac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}=\dfrac{c_{pa}T_{in}m_{in}+h_{ac}A_c(T_{ac}-T)}{mc_v}-\dfrac{T}{m}m_{in}\end{cases} \tag{7}$$

释能阶段储气室内空气压强和温度的变化趋势可表示为

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t}=\dfrac{-c_{\mathrm{pa}}T_{\mathrm{out}}m_{\mathrm{out}}+h_{\mathrm{ac}}A_{\mathrm{c}}(T_{\mathrm{ac}}-T)}{Vc_{\mathrm{v}}}R_{\mathrm{g}}\\ \dfrac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}=\dfrac{-c_{\mathrm{pa}}T_{\mathrm{out}}m_{\mathrm{out}}+h_{\mathrm{ac}}A_{\mathrm{c}}(T_{\mathrm{ac}}-T)}{mc_{\mathrm{v}}}+\dfrac{T}{m}m_{\mathrm{out}}\end{cases}\tag{8}$$

式中：T_{in}、T_{out} 分别为储气室进、出口空气温度；m_{in}、m_{out} 分别为储气室进、出口质量流量；h_{ac} 为气体与储气室壁之间的传热效率；A_{c} 为储气室壁面积；T、T_{ac} 分别为储气室内空气温度和室壁温度；m 为气体质量；V 为储气室容积；c_{v} 为空气定容比热容；R_{g} 为气体常数。

2　A-LADRC 策略及参数设计方法

在 CAES 系统进行并网时，需要满足电压幅值、相位及频率与电网均相同的条件，基于传统 PI 控制的预同步已经无法满足实际工程中对响应速度和调节精度的需求，因此本文采用抗扰度性能和精度更高的 LADRC 来代替 PI 控制，但由于频率和相位的变化是相互影响的，因此相位同步过快会带来频率的较大波动，不利于系统稳定。为此，本文在传统 LADRC 的基础上，提出了一种根据相角差大小对控制器带宽参数实时调整的 A-LADRC 策略，对预同步过程中频率和相角的耦合问题进行了改善，进一步优化了并网冲击问题。

2.1 LADRC 方法

LADRC 在非线性的基础上将扩张状态观测器线性化，采用一个简单的比例微分 PD(proportional derivative)控制组合，将其参数与观测器带宽相联系，简化控制器的整定，形成线性扩张状态观测器 LESO (linear extended state observer)；同时将状态误差反馈控制线性化，形成线性状态误差反馈 LSEF (linear state error feedback)控制，进一步简化为 PD 组合的设计。

2.1.1　LESO

LESO 以二阶系统为例，被控对象为

$$\ddot{y}=-a_1\dot{y}-a_0y+\omega+bu\tag{9}$$

式中：y、u 分别为系统的输出和输入；a_1、a_0 为控制器参数；b 为系统增益；ω 为扰动。当 b 的已知部分为 b_0 时，式(9)可以写成

$$\ddot{y}=f+b_0u\tag{10}$$

$$f=-a_1\dot{y}-a_0y+\omega+(b-b_0)u\tag{11}$$

式中，f 为总扰动，包括外扰与内扰。由于 f 未知且通过校正项可以估计出来，因此忽略 f，得到观测器方程为

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{z}}=[\boldsymbol{A}-\boldsymbol{LC}]\boldsymbol{z}+[\boldsymbol{B},\boldsymbol{L}]\boldsymbol{u}_c\\ \boldsymbol{y}_c=\boldsymbol{z}\end{cases}\tag{12}$$

式中：$\boldsymbol{z}$ 为观测器状态向量；$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{C}$ 为系数矩阵；$\boldsymbol{L}$ 为观测器误差反馈增益矩阵；$\boldsymbol{u}_{\mathrm{c}}$ 为输入矩阵；$\boldsymbol{y}_{\mathrm{c}}$ 为输出向量。观测器状态向量为

$$\begin{cases}\dot{z}_1=\beta_1(y-z_1)+z_2\\ \dot{z}_2=\beta_2(y-z_1)+z_3+b_0u\\ \dot{z}_3=\beta_3(y-z_1)\end{cases}\tag{13}$$

式中：z_1、z_2、z_3 为来自 LESO 的观测器状态；$\beta_1\sim\beta_3$ 为观测器增益，$\beta_1=3\omega_0$，$\beta_2=3\omega_0^2$，$\beta_3=3\omega_0^3$。

取观测器带宽为 ω_0，将观测器特征方程的极点配置在$-\omega_0$处，则系统的特征方程为

$$\lambda(s)=|s\boldsymbol{I}-(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{LC})|=(s+\omega_0)^3\tag{14}$$

式中，$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵。

2.1.2　LSEF 控制

由于扩张状态观测器能够实时估计并补偿内外部扰动，因此不必再采用积分器来消除静差，LSEF 可进一步简化为 PD 组合的设计，控制形式为

$$u_0=k_{\mathrm{p}}(R-z_1)-k_{\mathrm{d}}z_2\tag{15}$$

$$u=\frac{u_0-z_3}{b_0}\tag{16}$$

式中：k_{p}、k_{d} 分别为比例与微分的放大系数；R 为给定值。

系统闭环传递函数为

$$G_{\mathrm{cl}}=\frac{k_{\mathrm{p}}}{s^2+k_{\mathrm{d}}s+k_{\mathrm{p}}}\tag{17}$$

取控制器带宽为 ω_{c}，将上述闭环传递函数极点配置于$-\omega_{\mathrm{c}}$处，可以得到

$$\begin{cases} k_{\mathrm{p}} = \omega_{\mathrm{c}}^2 \\ k_{\mathrm{d}} = 2\omega_{\mathrm{c}} \end{cases} \tag{18}$$

2.2 A-LADRC 参数整定

对观测器带宽 ω_0 及控制器带宽 ω_{c} 2 个参数进行整定。对于观测器带宽 ω_0，其值越大，扩张状态观测器越能够快速观测并被控制器补偿，但同时观测器对噪声的敏感度也会增加。对于控制器带宽 ω_{c}，通常情况下其值越大，系统响应越快，但 ω_{c} 过大可能会使系统超调和产生严重振荡。对于大部分工程对象，ω_0 的取值约为 ω_{c} 的 4~10 倍，ω_0 取 2 500[21]。

在 CAES 并网预同步过程中，由于角频率和相位之间具有耦合关系，如果采用控制器带宽参数固定的 LADRC 可能会因为相位同步速度过快而引起系统频率不稳定，因此为了兼顾相位同步的精度和系统频率稳定性，本文设计了一种带宽参数自适应调整的线性自抗扰控制策略 A-LADRC。通过实时采集 CAES 侧相位 θ 与网侧的相位 θ_{g}，二者作差后同所设置的临界相位差进行比较，经过控制实时调整系统带宽 ω_{c}，具体为

$$\omega_{\mathrm{c}} = \begin{cases} \omega_{\mathrm{c0}} + k(\left|\theta - \theta_{\mathrm{g}}\right|) & \left|\theta - \theta_{\mathrm{g}}\right| \geqslant \theta_{\mathrm{k}} \\ \omega_{\mathrm{c0}} - k(\left|\theta - \theta_{\mathrm{g}}\right|) & \left|\theta - \theta_{\mathrm{g}}\right| < \theta_{\mathrm{k}} \end{cases} \tag{19}$$

式中：ω_{c0} 为 LADRC 的固定带宽取值，ω_{c0}=40；k 为自适应调节附加参数，大于 0，k=10；θ_{k} 为临界相位差，θ_{k}=15°。当相位差较大且大于 θ_{k} 时，需要加快相位同步，提高系统响应速度，因此在 ω_{c0} 的基础上根据相位差变化情况增加数值；当相位差较小且小于 θ_{k} 时，两侧相位已经接近同步，需要系统响应变慢，维持系统频率稳定，在 ω_{c0} 的基础上减小数值。

2.3 基于 A-LADRC 的 CAES 系统平滑并网策略

图 2 为本文所提基于 A-LADRC 的 CAES 平滑并网控制框图。

CAES 系统离网运行时，控制模式为 *U*/*f* 控制，开关 S_1 和 S_2 均置于状态 0，开关 S_3 和 S_4 均断开；

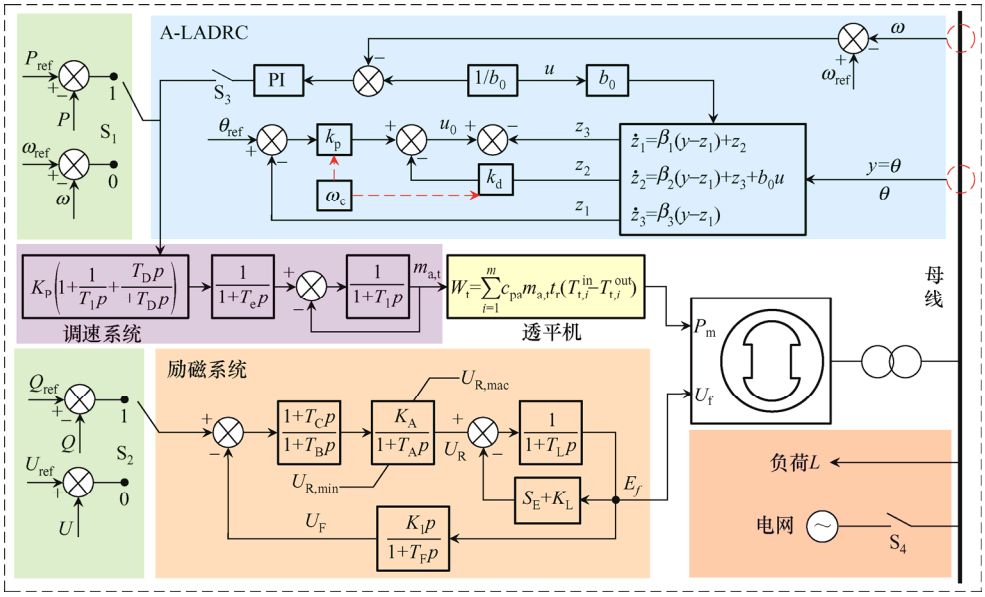


图 2 基于 A-LADRC 的 CAES 平滑并网控制框图

Fig. 2 Control block diagram of smooth grid-connection of CAES to power grid based on A-LADRC

在 CAES 并网预同步时，S_1、S_2 和 S_4 均断开，闭合 S_3，采用 A-LADRC 策略进行预同步；预同步完成满足并网条件时，断开 S_3，闭合 S_4，同时将 CAES 控制模式切换为 PQ 控制，S_1 和 S_2 均置于状态 1，完成并网。

在并网模式下，CAES 输出有功功率 P 和参考值 P_{ref} 的偏差进入调速器，以控制进入透平机的空气质量流量，从而改变透平机的输出功率，即发电机的输入机械功率 P_{m}，调节发电机的输出电功率完成并网。图 2 中，K_{p} 为 PID 调节器的放大倍数；

T_D 为微分时间常数；T_1 和 T_e 为相应环节的积分时间常数；T_A、T_B、T_C 和 T_L 为相应环节的时间常数；U_R 为励磁机励磁电压；K_A 为放大倍数；E_f 为发电机励磁电动势；S_E 为饱和系数；K_L 为自并励系数；K_F 为励磁负反馈环节放大倍数；T_F 为时间常数。类似的，CAES 将输出的无功功率 Q 和其参考值 Q_{ref} 的偏差值输入到励磁系统，生成励磁电压。一般情况下，励磁系统中会引入负反馈环节，以改善励磁系统的品质使励磁系统稳定运行。

在离网模式下，将 CAES 输出电压幅值 U 与参考值 U_{ref} 进行作差比较，经过励磁系统环节生成励磁电压；同样的，将系统角频率 ω 与参考值 ω_{ref} 进行作差比较，经过调速器环节，剩余环节参考有功功率控制。

3　稳定性分析

为了分析控制器参数对系统稳定性的影响，对系统进行小信号建模。图 3 和图 4 分别是 PI 控制和 A-LADRC 的简化控制框图，图 5 和图 6 分别为 PI 控制与 A-LADRC 传递函数等效框图。

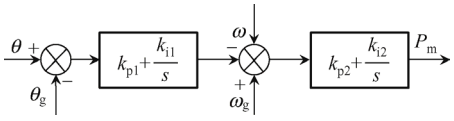


图 3　PI 控制框图

Fig. 3 Block diagram of PI control

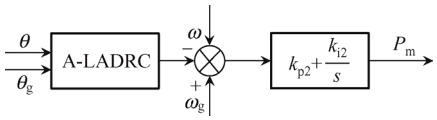


图 4　A-LADRC 框图

Fig. 4 Block diagram of A-LADRC

在图 5、图 6 中，$R(s)$为输入信号，$G_F(s)$为滤波器，$G_c(s)$为控制器，$G_p(s)$为被控对象，$Y(s)$为输出信号。为了便于分析，将角频率的输入信号看作系统的扰动 $N(s)$。其中，滤波器 $G_F(s)$和控制器 $G_c(s)$ 可分别表示为

$$G_F(s)=\frac{k_p(s^3+\beta_1 s^2+\beta_2 s+\beta_3)}{(k_p\beta_1+k_d\beta_2+\beta_3)s^2+(k_p\beta_2+k_d\beta_3)s+k_p\beta_3} \tag{20}$$

$$G_c(s)=\frac{(k_p\beta_1+k_d\beta_2+\beta_3)s^2+(k_p\beta_2+k_d\beta_3)s+k_p\beta_3}{b_0 s[s^2+(k_d+\beta_1)s+k_d\beta_1+k_p+\beta_2]} \tag{21}$$

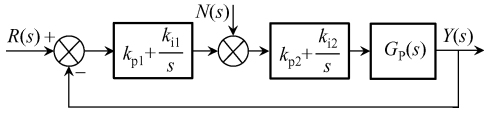


图 5　PI 控制传递函数等效框图

Fig. 5 Block diagram of PI control transfer function equivalent

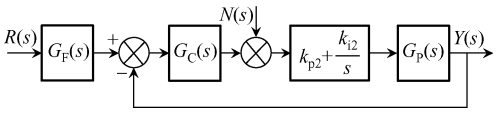


图 6　A-LADRC 传递函数等效框图

Fig. 6 Block diagram of A-LADRC transfer function equivalent

为了简化分析，重点讨论所提控制策略的动态性能，将 CAES 能系统透平机部分等效为一阶惯性环节，将同步发电机简化为二阶模型，可推出被控对象传递函数 $G_p(s)$为

$$G_P(s)=\frac{1}{T_C s+1}\frac{\frac{E_0 U\omega_0}{JZ}}{s^2+\frac{D}{J}s+\frac{E_0 U\omega_0}{JZ}} \tag{22}$$

式中：J 为转动惯量；Z 为等效阻抗。

可以得到基于 PI 控制和 A-LADRC 控制的系统开环传递函数分别为

$$G_1(s)=G_p(s)\left(k_{p1}+\frac{k_{i1}}{s}\right)\left(k_{p2}+\frac{k_{i2}}{s}\right) \tag{23}$$

$$G_2(s)=G_F(s)G_c(s)G_p(s)\left(k_{p2}+\frac{k_{i2}}{s}\right) \tag{24}$$

为了验证本文所提 A-LADRC 控制的稳定性，将本文所提方案与传统 PI 控制进行动态性能比较，二者的开环传递函数伯德图如图 7 所示。由图 7 可以看出：在低频段，A-LADRC 曲线幅值较大且斜率绝对值较大，稳态误差较小，系统稳态精度较高；在中频段，系统的截止频率降低了，系统的响应速度变慢，但占据较宽的频段区间，可以较好地保证系统稳定性；在高频段，A-LADRC 曲线幅值较低且衰减迅速，提高了系统的抗干扰能力。

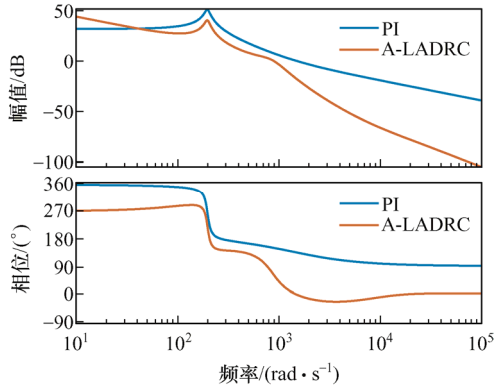


图 7 系统开环传递函数伯德图

Fig. 7 Bode diagram of open loop transfer function of system

4 仿真分析和实验验证

4.1 仿真分析

所提 A-LADRC 算法是通过控制进入 CAES 系统透平机的空气质量流量来实现对输出相位和频率的控制，进而达到与电网的同步。因此，对于除本文用于仿真的 CAES 系统外，其他类型的 CAES 均可以采用 A-LADRC 算法来控制释放空气的质量流量来达到控制目的。基于本文设计的 CAES 系统，采用 MATLAB/ Simulink 仿真平台搭建上述系统模型，通过仿真所得到频率、电压、电流、功率等波形来验证 A-LADRC 算法相较于传统 PI 控制在减小并网冲击电流实现 CAES 平滑并网方面的优越性。系统主要参数见表 1。

CAES 在并网前采用 *U*/*f* 控制策略，其输出电压参考值 U_{ref}设置为额定电压，用标幺值表示，设置为 1，角频率参考值 ω_{ref}设置为 100π；并网后采用定功率控制，电网电压为 35 kV，无功功率参考值 Q_{ref}设置为 0，有功功率参考值 P_{ref}用标幺值表示，设置为 0.8。A-LADRC 策略下的 CAES 和网侧相位差波形及控制器带宽 ω_c 的变化波形分别如图 8 和图 9 所示。通过波形可以看出，二者的相位差大于 15°时，相位差减小速度较快；当相位差小于 15°时，相位差减小速度变慢，直到减小到 0，符合带宽自适应调节公式的规律。同样的，控制器

表 1 CAES 系统并网设计参数

Tab. 1 Design parameters of grid-connection CAES system

设备	参数	数值
压缩机	额定功率/MW	24.05
	单级压比	3.23
	等熵效率	0.84
	空气流量/(kg·s^{-1})	78.64
发电机	额定容量/MVA	200
	额定电压/kV	13.8
LADRC	控制器带宽 ω_{c0}	400
	观测器带宽 ω_0	2 500
透平机	额定功率/MW	76.3
	单级膨胀比	2.82
	等熵效率	0.88
	空气流量/(kg·s^{-1})	172.33
变压器	额定容量/MVA	210
	电压等级/kV	13.8/35.0
PI 调节器	k_{p1}，k_{p2}	1, 0.6
	k_{i1}，k_{i2}	0.1, 0.02

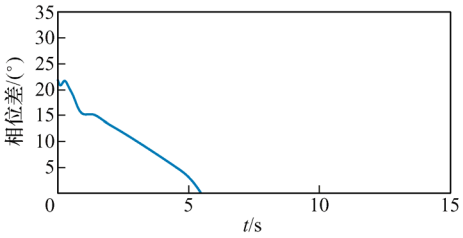


图 8 A-LADRC 策略下相位差的变化波形

Fig. 8 Waveform of phase difference change under A-LADRC strategy

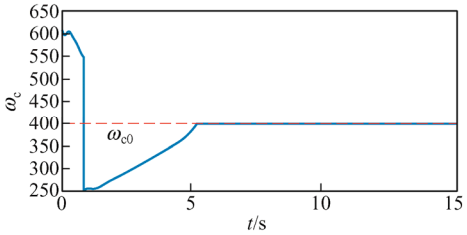


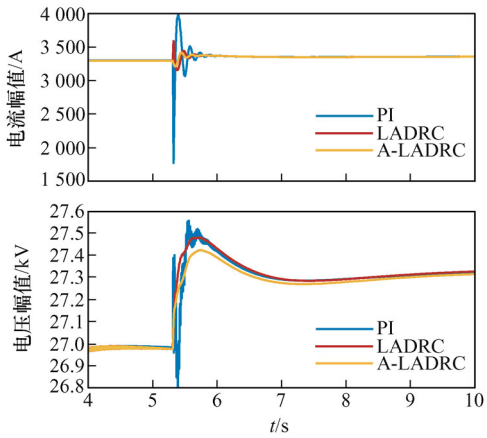
图 9 控制器带宽 ω_c 的变化波形

Fig. 9 Waveform of controller bandwidth ω_c change

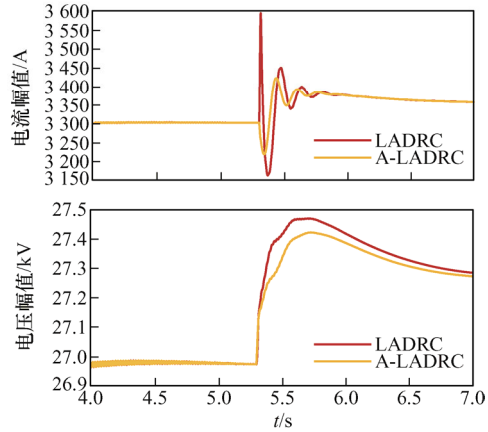
带宽 ω_c 在相位差大于 15°时处于增大的状态，大于 ω_{c0}；当相位差小于 15°时，控制器带宽 ω_c 的波形处于 ω_{c0} 下方，并处于逐渐增大的状态，CAES 并网完成后，二者的相位同步，相位差为 0，ω_c=ω_{c0}。

在同一系统下，分别采用 PI 控制、LADRC 及带宽参数自适应调整的 A-LADRC 对 CAES 并网进

行预同步控制，CAES 系统在控制指令下的响应时间约为 1~2 s。不同控制下的并网电流幅值和电压幅值波形及相对应的局部放大波形如图 10 所示。从电流波形可以看出，CAES 并网后，不同控制下的电流均会出现振荡，但最终都稳定在同一数值。其中，PI 控制下的冲击电流最大，其幅值最大约为 4.0 kA，且振荡幅度最大；LADRC 下的冲击电流最大幅值接近 3.6 kA，振荡幅值最大约为 400 A；而 A-LADRC 下的冲击电流在 LADRC 的基础上减小了约 200 A，最大幅值约为 3.4 kA，且振荡幅度最小。从电压波形中可以看出，PI 控制下的电压在并网后出现较高的冲击，而 LADRC 及 A-LADRC 下的并网点电压出现一定程度地上升然后恢复至稳定状态，当采用本文提出的 A-LADRC 策略时，并网点冲击电压上升幅度较小，整体变化曲线相对平滑。



(a) 完整时长波形

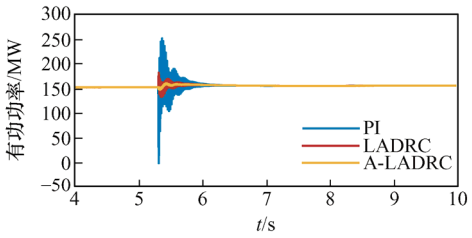


(b) 局部放大波形

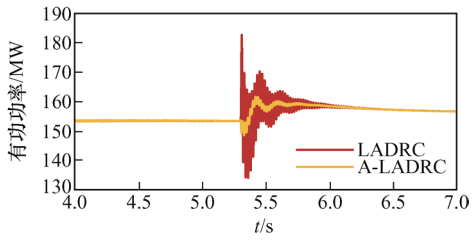
图 10　不同控制下的并网电流幅值和电压幅值波形

Fig. 10 Waveforms of grid-connection current amplitude and voltage amplitude under different control

不同控制下 CAES 输出的有功功率波形和系统频率波形分别如图 11 和图 12 所示。从压缩空气输出的有功功率波形可以看出，3 种控制下的有



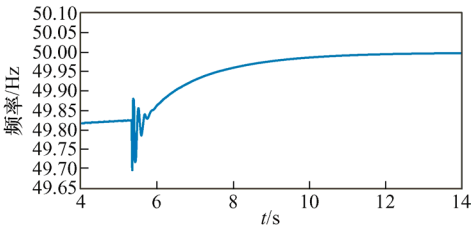
(a) 完整时长波形



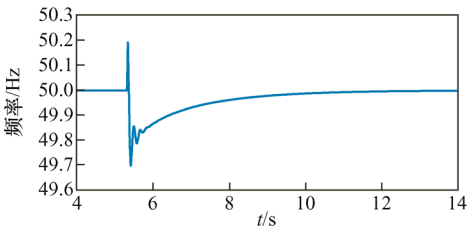
(b) 局部放大波形

图 11　不同控制下 CAES 输出有功功率波形

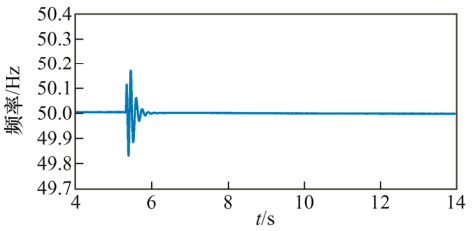
Fig. 11 CAES output active power waveforms under different control



(a) PI控制下的频率波形



(b) LADRC下的频率波形



(c) A-LADRC下的频率波形

图 12　不同控制下的频率波形

Fig. 12 Frequency waveforms under different controls

功功率在并网后开始了不同程度的振荡，其中 PI 控制下 CAES 输出的有功功率振荡幅度最大且振荡时间最长，LADRC 次之，而 A-LADRC 策略下的有功功率变化较为平缓，没有大幅度的振荡，且很快恢复至稳定状态。在系统频率波形中，PI 控制下的频率在并网前的预同步过程中均未达到 50 Hz 的标准频率，且并网后频率振荡较为严重，恢复至稳定所用时间较长；LADRC 策略下的频率优于前者，但在并网时刻出现了较大幅度的振荡，且较慢恢复至稳定状态；而本文所提 A-LADRC 策略下的频率质量最优，除在并网时刻发生了幅度较小且时间较短的振荡以外，频率均维持在 50 Hz，最大变化幅度未超过±0.2 Hz。

综上分析可以看出，A-LADRC 策略下并网产生的冲击电流更小，并网点电压变化相对更加平滑，在整个并网过程中的系统频率和 CAES 输出功率波动程度最小并且能够在较短时间内恢复稳定。因此，本文所提的 A-LADRC 策略的有效性得到了验证。

4.2 实验验证

根据本文所设计的带宽参数自适应调整公式(即式(19))可知，自适应调节附加参数 k 和临界相位差 θ_k 的选取都会影响系统带宽 ω_c。通常情况下，相位差小于 15° 即可并网，因此选取 θ_k 为固定值 15°，重点研究 k 对 A-LADRC 的影响。本文搭建了控制器级的硬件在环测试平台，如图 13 所示。

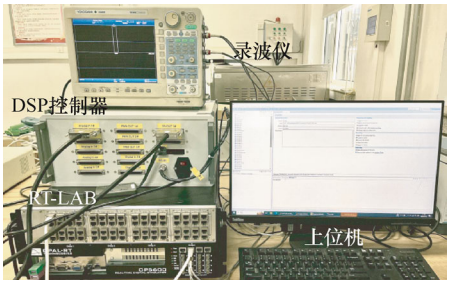


图 13 控制器级硬件在环测试平台

Fig. 13 Controller level hardware in the ring test platform

该硬件在环测试平台主要包括 RT-LAB 实时仿真机(OP5600)、DSP 控制器、录波仪(DL850)及上位机等。CAES 系统并网仿真模型通过上位机下载到 RT-LAB 仿真机中，本文所提出的 A-LADRC 策略部署在 DSP 控制器中，DSP 控制器产生的 PWM 脉冲传送至 RT-LAB 的脉冲输入端口，通过录波仪录制实验波形。实验选取 θ_k=15°，k 分别选取 5、10、15 时，对应参数下的相位差变化、预同步过程的频率及并网电流、电压波形如图 14~图 17 所示。

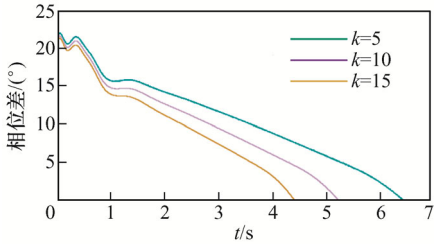


图 14 相位差变化波形

Fig. 14 Waveforms of phase difference change

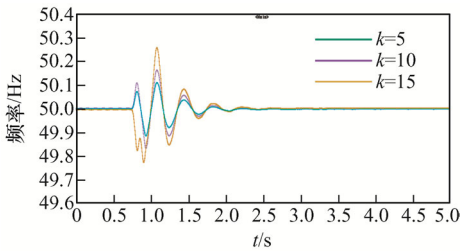


图 15 预同步时的频率波形

Fig. 15 Frequency waveforms during pre-synchronization

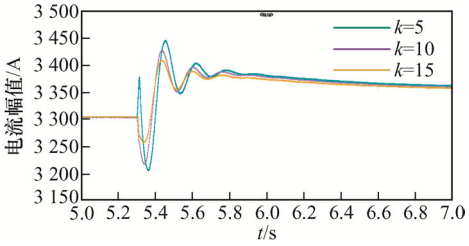


图 16 并网电流幅值波形

Fig. 16 Waveforms of grid-connection current amplitude

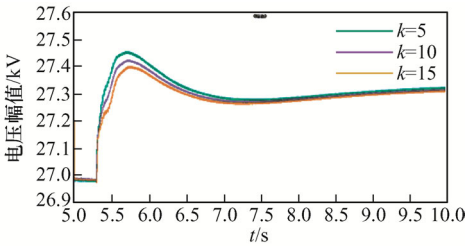


图 17 并网电压幅值波形

Fig. 17 Waveforms of grid-connection voltage amplitude

通过实验波形可以看出，k 取不同值时的相位差变化情况是不一样的，k 越大，相应的带宽 ω_c 越大，系统响应速度越快，因此 CAES 的相位调节越快，和网侧的相位差就会在较短的时间减小到 0。由于相位和频率存在耦合关系，相位变化过快会引起频率的不稳定，因此从预同步时的频率波形可以看出，随着 k 的增大，频率呈现振荡幅度增大的趋势。对于并网时的电压和电流，k 取较大值时，系统响应速度较快，对于相位的调节更加精确，在并网时，CAES 侧的相位与网侧相位更加同步，所以并网产生的冲击电流也会小一些，同时并网冲击电压也相应较小。从图 16 和图 17 可以看出，并网冲击电流和冲击电压都会随着 k 的增大而减小。综合上述分析，k 过大会影响预同步过程的频率稳定，k 过小会降低相位同步的精确度，从而导致并网冲击较大，因此为了兼顾频率的稳定性及减小并网冲击，k 取中间值 10。

5　结语

为了改善 CAES 接入电网的特性，减小并网冲击电流，实现平滑并网，本文提出了一种带宽参数自适应调整的线性自抗扰平滑并网控制策略，针对并网过程中频率和相位的耦合问题，对系统带宽 ω_c 进行了自适应调节设计，并在仿真平台对所提控制策略进行了验证。最后，搭建了控制器级的硬件在环测试平台，研究了自适应调节附加参数 k 对 A-LADRC 的影响，并选择了合适的 k 值。结果表明，所提自适应控制策略能够有效减小并网冲击电流，以及并网过程中的频率和功率波动，实现了平滑并网。

参考文献：

[1] 刘笑驰, 梅生伟, 丁若晨, 等. 压缩空气储能工程现状、发展趋势及应用展望[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(10): 38-47, 102.
Liu Xiaochi, Mei Shengwei, Ding Ruochen, et al. Current situation, development trend and application prospect of compressed air energy storage engineering projects [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(10): 38-47, 102. (in Chinese)

[2] Chen Laijun, Zheng Tianwen, Mei Shengwei, et al. Review and prospect of compressed air energy storage system [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(4): 529-541.

[3] Cheng Jie, Li Rui, Choobineh F F, et al. Dispatchable generation of a novel compressed-air assisted wind turbine and its operation mechanism [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(4): 2201-2210.

[4] Guo Zhongjie, Wei Wei, Chen Laijun, et al. Operation of distribution network considering compressed air energy storage unit and its reactive power support capability [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 2954-2965.

[5] 缪惠宇, 杨赟, 梅飞, 等. 一种虚拟同步机运行模式平滑切换控制策略[J]. 太阳能学报, 2020, 41(9): 121-128.
Miao Huiyu, Yang Yun, Mei Fei, et al. A seamless mode switching control strategy in virtual synchronous generator [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(9): 121-128. (in Chinese)

[6] Li Yaran, Fu Long, Meng Ke, et al. Autonomous control strategy for microgrid operating modes smooth transition [J]. IEEE Access, 2020, 8: 142159-142172.

[7] 王开让, 赵一名, 孟建辉, 等. 基于自适应模型预测控制的光储虚拟同步机平滑并网策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 831-839.
Wang Kairang, Zhao Yiming, Meng Jianhui, et al. Smooth grid-connected strategy for photovoltaic-storage virtual synchronous generator based on adaptive model predictive control [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 831-839. (in Chinese)

[8] Wang Guishuo, Wang Xiaoli, Gao Xiang. Improved seamless switching control strategy for AC/DC hybrid microgrid [J]. IEEE Access, 2021, 9: 55790-55801.

[9] 朱超群, 沈杰, 李洁, 等. 基于改进线性二次调节器的微电网模式平滑切换控制[J]. 电源学报, 2025, 23(3): 330-342.
Zhu Chaoqun, Shen Jie, Li Jie, et al. Smooth switching control of microgrid modes based on improved linear quadratic regulator [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(3): 330-342. (in Chinese)

[10] El Azzaoui M. Start-up and smooth grid connection of the doubly fed induction generator [C]// 2021 IEEE 9th International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE). Oshawa, ON, Canada, 2021: 147-152.

[11] 胡红钱, 施伟锋, 张威. 柴油发电机组准同期并网策略及动态仿真[J]. 中国航海, 2016, 39(4): 29-33, 70.
Hu Hongqian, Shi Weifeng, Zhang Wei. Quasi-synchronous connection strategy and dynamic simulation of diesel generator set [J]. Navigation of China, 2016, 39(4): 29-33, 70. (in Chinese)

[12] 高志强. 自抗扰控制思想探究[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1498-1510.
Gao Zhiqiang. On the foundation of active disturbance rejection control [J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(12): 1498-1510. (in Chinese)

[13] Zhang Bin, Tao Long, Zhou Xuesong. Adaptive linear active disturbance rejection control with deviation differential in DC bus voltage of wind power system [J]. IEEE Access, 2021, 9: 57808-57818.

[14] 马幼捷, 杨清, 周雪松, 等. 基于模糊神经网络的储能侧双向 DC-DC 变换器自抗扰控制策略[J]. 太阳能学报, 2023, 44(10): 488-495.
Ma Youjie, Yang Qing, Zhou Xuesong, et al. Active disturbance rejection control strategy of bidirectional DC-DC converter on energy storage side based on fuzzy neural network [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(10): 488-495. (in Chinese)

[15] Sun Changhao, Liu Chang'an, Feng Xueling, et al. Visual servoing of flying robot based on fuzzy adaptive linear active disturbance rejection control [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2021, 68(7): 2558-2562.

[16] 段茜月, 陈燕东, 徐元璨, 等. 一种改进线性扩张状态观测器的自抗扰控制宽频带振荡抑制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(13): 12-24.
Duan Xiyue, Chen Yandong, Xu Yuancan, et al. A wideband oscillation suppression method for active disturbance rejection control with an enhanced linear expansion state observer [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(13): 12-24. (in Chinese)

[17] 徐宇捷, 周扬忠. 基于线性自抗扰的双直线电机改进交叉耦合同步控制研究[J]. 电源学报, 2026, 24(1): 310-320.
Xu Yujie, Zhou Yangzhong. Research on improved cross-coupled synchronization control for dual linear motors based on linear active disturbance rejection [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(1): 310-320. (in Chinese)

[18] 梅生伟, 张通, 张学林, 等. 非补燃压缩空气储能研究及工程实践: 以金坛国家示范项目为例[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(5): 1-8, 14.
Mei Shengwei, Zhang Tong, Zhang Xuelin, et al. Research and engineering practice of non-supplementary combustion compressed air energy storage: Taking Jintan national demonstration project as an example [J]. Experimental Technology and Management, 2022, 39(5): 1-8, 14. (in Chinese)

[19] 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): 2295-2305.
Li Pan, Yang Chen, Chen Wen, et al. Dynamic characteristics of compressed air energy storage system and the regulation system [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2295-2305. (in Chinese)

[20] Calero I, Cañizares C A, Bhattacharya K. Compressed air energy storage system modeling for power system studies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3359-3371.

[21] 梁青, 王传榜, 潘金文, 等. 线性自抗扰控制参数 b_0 辨识及参数整定规律[J]. 控制与决策, 2015, 30(9): 1691-1695.
Liang Qing, Wang Chuanbang, Pan Jinwen, et al. Parameter identification of b_0 and parameter tuning law in linear active disturbance rejection control [J]. Control and Decision, 2015, 30(9): 1691-1695. (in Chinese)



孟建辉

作者简介：

孟建辉(1987—)，男，通信作者，博士研究生，高级工程师。研究方向：新能源发电并网控制技术，电力电子技术在电力系统中的应用。E-mail：mengjianhui2008@163.com。

孙亚鑫(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：新能源发电并网控制技术。E-mail：220222213271@ncepu.edu.cn。

张自力(1985—)，男，博士研究生，高级工程师。研究方向：新型电力系统控制技术。E-mail：z86sifan@163.com。

王晨雨(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：新能源发电并网控制技术。E-mail：1406046382@qq.com。

(责任编辑：孙美菊)