第 52 卷 第 5 期：2150-2158 高电压技术 Vol.52, No.5: 2150-2158
2026 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250544

基于虚拟振荡控制的构网型储能暂态特性优化方法

李建林[1]，裴盛泽[1]，游洪灏[1]，卢冠铭[1]，吕洪章[2]，李连玉[2]
（1. 国家能源用户侧储能创新研发中心(北方工业大学)，北京 100144;
2. 青岛威控电气有限公司，青岛 266200）

摘　要：构网型控制作为新型电力系统的关键性技术，通过自主构建电压/频率基准、提供虚拟惯量及主动阻尼控制，有效解决了高比例可再生能源并网导致的稳定性难题。安德罗诺夫-霍普夫振荡器(Andronov-Hopf oscillator, AHO)控制是一种基于非线性控制器的构网型控制方法，相比传统下垂控制具有更优越的动态性能，但其暂态稳定性仍有待提升。该文提出了一种改进型 AHO 控制方法，通过改进传统 AHO 的电压与频率动态方程，将原有非线性下垂特性中不利于暂态稳定性的部分转化为有利于系统稳定的形式。通过李雅普诺夫函数初步确定了改进型 AHO 控制的可行性，然后基于 MATLAB/Simulink 仿真以及实验表明，改进型 AHO 控制的构网型储能变流器系统在负载变化下的频率波动和稳态误差更小，功率跟踪能力更好。所提出的改进型 AHO 控制在重构非线性下垂系数后，系统的稳定性与传统 AHO 控制相比有显著提高，较下垂控制有小幅提升。

关键词：构网型控制；暂态稳定性；AHO 控制；动态方程；非线性下垂特性；李雅普诺夫函数

Transient Characteristics Optimization Method for Grid-forming Energy Storage Based on Virtual Oscillation Control

LI Jianlin[1], PEI Shengze[1], YOU Honghao[1], LU Guanming[1], LYU Hongzhang[2], LI Lianyu[2]
(1. National User-Side Energy Storage Innovation Research and Development Center (North China University of Technology), Beijing 100144, China; 2. Qingdao Weikong Electric Co., Ltd., Qingdao 266200, China)

Abstract: Grid-forming control, as a key technology for the new power system, effectively addresses the stability challenges caused by the high proportion of renewable energy integration by autonomously establishing voltage/frequency references, providing virtual inertia and active damping control. The Andronov-Hopf Oscillator (AHO) control, a grid-forming control method based on nonlinear controllers, offers superior dynamic performance compared to traditional droop control, but its transient stability still needs improvement. This paper proposes an improved AHO control method, by which the voltage and frequency dynamic equations of the traditional AHO are modified to transform the parts of the original nonlinear droop characteristics that are detrimental to transient stability into forms that are beneficial to system stability. The feasibility of the improved AHO control is initially determined through the Lyapunov function. Then simulation experiments based on MATLAB/Simulink and experiments show that the improved AHO control grid-type energy storage converter system has smaller frequency fluctuations and steady-state errors under load changes, and better power tracking capabilities. After reconstructing the nonlinear droop coefficients, the proposed improved AHO control significantly enhances the system stability compared to the traditional AHO control, and slightly improves it compared to droop control.

Key words: grid-forming control; transient stability; AHO control; dynamic equation; nonlinear sag characteristic; Lyapunov function

0　引言

新型电力系统呈现高比例新能源和高比例电力电子变流器的“双高”发展趋势导致电力系统惯性下降、频率电压调节能力不足等问题日益凸显。而同步发电机占比逐渐下降，导致电网呈现弱阻尼、弱支撑的抵抗干扰性，这将给新能源电力系统的安全稳定运行带来新的稳定性和振荡问题[1-5]。构网型控制从运行原理上看，是通过变流器经过阻抗向系统并网点提供一个具有一定维持能力的电压源，被

基金资助项目：青岛市重大科技专项(25-1-1-gjgg-4-gx)。
Project supported by Major Science and Technology Special Projects in Qingdao City(25-1-1-gjgg-4-gx).

视为支撑新型电力系统建设的关键装备，对支持电网频率和电压发挥了巨大作用，与同步发电机相比，构网型储能变流器的运行特性主要由虚拟惯量，虚拟阻尼等参数决定，没有具体的物理限制，参数选取灵活性高。成为增强新型电力系统灵活性与可靠性的关键手段，为破解新能源消纳与电网安全矛盾提供了创新路径[6-7]。

当前主流的构网型控制方法包括下垂控制、虚拟同步机(virtual synchronous generator，VSG)控制和虚拟振荡器控制(virtual oscillator control，VOC)。下垂控制通过模拟有功-频率(*P*-*f*)和无功-电压(*Q*-*U*)实现多逆变器自主并联运行，但其缺乏惯性响应能力[8-9]，虚拟同步机控制基于同步发电机机电暂态方程构建虚拟惯量与阻尼，可提供惯性支撑，但易受二阶系统特性限制引发功率振荡[10-11]，虚拟振荡器控制采用瞬时电流反馈机制，具备毫秒级动态响应和谐波抑制优势[12]，与下垂控制相比具有更快的时间响应和更少的能量损耗[13-15]。但暂态稳定性和无功功率跟踪能力仍有不足[16-17]。

针对安德罗诺夫-霍普夫振荡器控制(Andronov-Hopf oscillator, AHO)的暂态稳定性和无功功率跟踪缺陷，已有研究提出了多种改进方案。文献[18]通过在控制结构中加入 PD 环节，提出了一种用于虚拟振荡器控制逆变器的可调度控制。文献[19]通过在控制系统中添加自适应惯性(virtual inertia，VI)环节，提出了一种改进的可调度虚拟振荡器控制。文献[20]采用由谐振控制器构成的新型 VI-AHO 控制器来提高系统的性能。文献[21]提出了自适应动态，利用无功功率误差与标称振荡幅度之间的关系为逆变器无功功率提供了更好的跟踪性能。文献[22]提出了一种 VOC 控制逆变器的功率去耦控制策略，可以实现逆变器的功率去耦，减小稳态误差。文献[23]首次提出了 AHO 控制构网型逆变器的非线性下垂特性。文献[24]系统的描述了 AHO 控制构网型逆变器的稳定性分析，并提出了一种详细的 VOC 控制器阻抗模型，分析了非线性项如何影响系统稳定性。文献[25]提出了一种具有通用 VOC 方法的基于无源端口哈密顿系统理论，使构网型逆变器具有更强的同步稳定性。然而，上述方法或受限于参数整定复杂性，或难以兼顾动态响应与稳态精度，尚未解决 AHO 控制的暂态稳定性缺陷。

针对以上问题，文章提出了一种重构非线性下垂特性的优化方法。通过将传统 AHO 中单调递减的非线性下垂系数转化为电压幅值依赖的递增形式，显著提升了构网型储能变流器在负载变化下的暂态稳定性。最后基于 MATLAB/Simulink 仿真对比不同控制策略的动态响应特性，验证了所提方法的有效性。

1 AHO 控制的构网型储能变流器系统

1.1 AHO 控制原理与动态特性分析

VOC 通过虚拟振荡电路通过非线性元件 $g(u)$ 生成正交正弦波，使多逆变器输出电压沿相同极限环自发同步[26]。基于 VOC 的构网型储能变流器控制框图如图 1 所示。VOC 的理论基础为非线性系统的极限环理论，通过设计虚拟振荡电路，使受控逆变器等效为一个自持振子，当系统未受外部扰动时，逆变器的输出电压将沿某一特定极限环自发振荡，并通过非线性反馈机制维持振幅与频率的稳定性[27]，VOC 的极限环特性如图 2 所示。

图中，L 为虚拟电感；C 为虚拟电容；R 为虚拟电阻；$g(u)$为非线性元件；K_i 为输入电流比例系数；K_v 为输出电压比例系数；i_s 为可控电流源；u_dc 为直流侧电压；L_f 为逆变侧电感；C_f 为滤波电容；

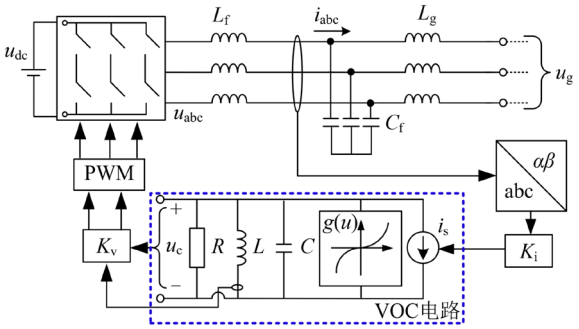


图 1 基于 VOC 的构网型储能变流器控制框图

Fig.1 Control block diagram of VOC based grid-forming energy storage converter

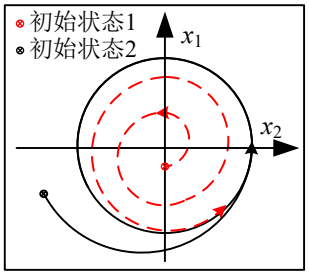


图 2 虚拟振荡器的极限环特性

Fig.2 Limit cycle characteristics of virtual oscillator

L_g 为网侧电感；u_{abc} 为逆变器端电压；u_c 为电容电压；u_g 为网侧电压。AHO 控制回路基于 VOC 改进设计，通过在 VOC 回路中串联非线性电压源与并联非线性电流源构建非线性振荡电路，控制框图如图 3 所示。

该架构主要由非线性电压源 u_m、非线性电流源 i_m、可控电压源 u_s、可控电流源 i_s、三角函数变换模块 $R(\varphi)$及比例放大器 K_i 和 K_v 组成。输入电流差信号首先通过三角函数变换模块完成 $\alpha\beta$ 至 dq 坐标系的转换，生成正交分量 u_1 与 u_2，再分别经电流比例放大器 K_i 调节后，注入串联非线性电压源与并联非线性电流源。其中，非线性电压源与电流源的动态特性由以下方程表示：

$$\begin{cases} u_m = \dfrac{\xi}{\omega_n}(2X_n^2 - \|\boldsymbol{x}\|^2)\cdot u_c \\ i_m = \dfrac{\xi}{\omega_n}(2X_n^2 - \|\boldsymbol{x}\|^2)\cdot i_L \end{cases} \tag{1}$$

式中：X_n 为标称振荡幅度；$\boldsymbol{x}$ 表示两个振子 $x_1=u_c$，$x_2=i_L$；u_m 和 i_m 共同作用，保证$\|\boldsymbol{x}\|\to\sqrt{2}X_n$ 渐进成立；ω_n 为系统固有频率；ξ 是非线性扩展增益。控制回路中，虚拟电感 L 与电容 C 构成谐振网络，生成固定频率 $\omega_m=1/\sqrt{LC}$ 的基准振荡信号。电容电压 u_c 与电感电流 i_L 作为核心状态变量，通过非线性反馈机制动态调节振荡幅度与功率偏差，生成的正交分量经比例放大器 K_v 调节后，输入至脉宽调制模块，最终作为控制信号输入至构网型储能变流器的主电路控制系统。

以电容电压 u_c 和电感电流 i_L 为状态变量，结合式(1)可推导出系统的动态微分方程组，是基于霍普夫分岔[28]的核心方程：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi(2X_n^2 - \|\boldsymbol{x}\|) & -\omega_n \\ \omega_n & \xi(2X_n^2 - \|\boldsymbol{x}\|) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中：$2X_n^2-\|\boldsymbol{x}\|$表示周期性运动。该模型能够产生固定半径为$\sqrt{2}X_n$ 和恒定旋转频率为ω_n的圆形极限环螺旋状态轨迹，如图 2 所示。

进一步考虑虚拟电感 L 与电容 C 的谐振网络特性，结合式(1)和式(2)，可得到状态变量的详细动力学方程：

$$\begin{cases} C\dfrac{\mathrm{d}u_c}{\mathrm{d}t} = -i_L + \dfrac{\xi}{\zeta\omega_n}(2X_n^2 - \|\boldsymbol{x}\|^2)u_c - u_1 \\ L\dfrac{\mathrm{d}i_L}{\mathrm{d}t} = u_c + \dfrac{\xi}{\omega_n}(2X_n^2 - \|\boldsymbol{x}\|^2)i_L - u_2 \end{cases} \tag{3}$$

结合电压和相位角的基本定义式和式(2)得到

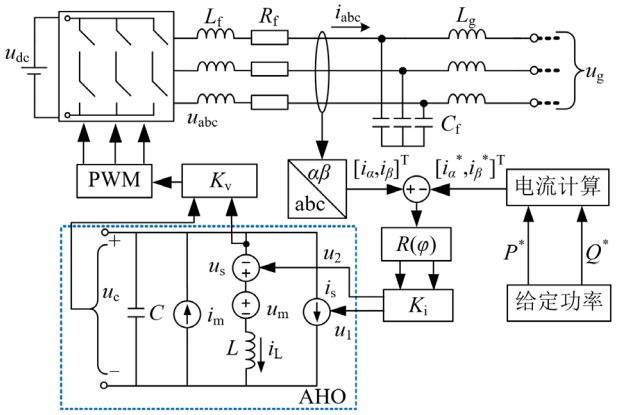


图 3 基于 AHO 控制的构网型储能变流器控制框图

Fig.3 Control block diagram of grid-forming energy storage converter based on AHO control

电压和相位角的动力学模型：

$$\begin{cases} \dot{U} = \mu U(U_n^2 - U^2) - \dfrac{K_vK_i}{3CU}(Q - Q^*) \\ \dot{\delta} = \omega_n - \dfrac{K_vK_i}{3CU^2}(P - P^*) \\ \mu = \dfrac{2\xi}{K_v^2} \end{cases} \tag{4}$$

式中：P 和 Q 为输出功率；P^*和 Q^*是给定功率；U_n是逆变器额定电压幅值；U 和 δ 分别是电压的幅值和相角；μ 是常量，决定$U_n^2-U^2$ 的收敛速度。设置电压导数为 0，相位角导数为 ω，稳态电压幅值 U 与频率 ω 关系分别为：

$$\begin{cases} U^2 = U_n^2 - \dfrac{K_vK_i}{3\mu CU^2}(Q - Q^*) \\ \omega = \omega_n - \dfrac{2K_vK_i}{3CU^2}(P - P^*) \end{cases} \tag{5}$$

因此，AHO 控制的输出电压幅度和角频率表现出非线性下垂的特性，可以利用该特性分析 AHO 控制系统的暂态稳定性。

1.2 AHO 控制系统的暂态稳定性分析

影响 AHO 控制系统稳定性的关键因素在于其内部的非线性下垂特性。因此，研究构网型储能变流器在 AHO 控制中的调节机制，需基于其非线性下垂特性建立动力学模型。通过将电压方程重构为趋近于下垂控制的 P-f 和 Q-U 特性关系，讨论 AHO 控制的稳定性。首先将电压方程简化：

$$U = U_n - \frac{K_vK_i}{3\mu CU^2(U + U_n)}(Q - Q^*) \tag{6}$$

基于式(5)的频率方程和式(6)所示的电压方程，

可推导出具有下垂控制特征的等效下垂系数表达式，如式(7)所示：

$$\begin{cases} n'_{\mathrm{q}} = \dfrac{K_{\mathrm{v}}K_{\mathrm{i}}}{3\mu CU^2(U+U_{\mathrm{n}})} \\ m'_{\mathrm{p}} = \dfrac{2K_{\mathrm{v}}K_{\mathrm{i}}}{3CU^2} \end{cases} \tag{7}$$

式中：n'_{q}和m'_{p}分别是无功下垂系数和有功下垂系数。

如图 4 所示，*U*-*Q* 下垂系数与 *ω*-*P* 下垂系数的动态分布呈现显著象限差异性，在第 1 象限中非线性下垂系数在电网电压骤降时呈现单调递减特性，这会恶化暂态稳定性。由于最大可传输功率与电压幅值直接相关，当电网电压跌落时，AHO 的非线性下垂系数随电压降低进一步减小，导致输出电压加速下降，显著削弱系统功率传输能力。单调递减的无功下垂系数通过放大电压跌落、削弱功率传输裕度，恶化系统的暂态稳定性，难以满足构网型储能变流器系统的动态响应需求，相关参数详见表 1。

2 改进型 AHO 控制的构网型储能变流器系统

2.1 动态方程优化

为提升 AHO 的暂态稳定性，需对其电压与相位角动力学模型进行重构。传统 AHO 控制中频率调节的下垂系数n'_{q}和电压调节的下垂系数m'_{p}均呈现非线性衰减特性，导致系统阻尼能力随扰动幅值增大而显著下降。为此，文章提出在动态方程中引入基于状态变量的反馈补偿项 U^3，以抑制下垂系数的非线性特性对暂态稳定性的影响。

$$\begin{cases} \dot{U} = \dfrac{\xi}{K_{\mathrm{v}}^2}U(2U_{\mathrm{n}}^2 - 2U^2) - \dfrac{K_{\mathrm{v}}K_{\mathrm{i}}}{3CU}(Q-Q^*)\cdot U^3 \\ \dot{\delta} = \omega_{\mathrm{n}} - \dfrac{K_{\mathrm{v}}K_{\mathrm{i}}}{3CU^2}(P-P^*)\cdot U^3 \end{cases} \tag{8}$$

同样设置电压导数为 0，相位角导数为 *ω*，稳态电压幅值 *U* 与频率 *ω* 关系为：

$$\begin{cases} U^2 = U_{\mathrm{n}}^2 - \dfrac{K_{\mathrm{v}}K_{\mathrm{i}}U}{3\mu C}(Q-Q^*) \\ \omega = \omega_{\mathrm{n}} - \dfrac{2K_{\mathrm{v}}K_{\mathrm{i}}U}{3C}(P-P^*) \end{cases} \tag{9}$$

通过将非线性下垂系数与 U^3 相乘，实现了对功率偏差 Q–Q^*和 P–P^*的动态放大。在电压较高时，U^3 显著增大，增强了系统对功率偏差的敏感性，从而加速调节过程；而在低电压时，U^3 的减小则避免了过度调节引发的振荡。式(8)和式(9)通过 U^3 实现了电压与功率的非线性耦合。这种耦合不仅保留了 AHO 的快速响应特性，还缓解了其在高/低电压区域的控制矛盾。电压幅值模型可等价为具有非线性下垂系数的形式。

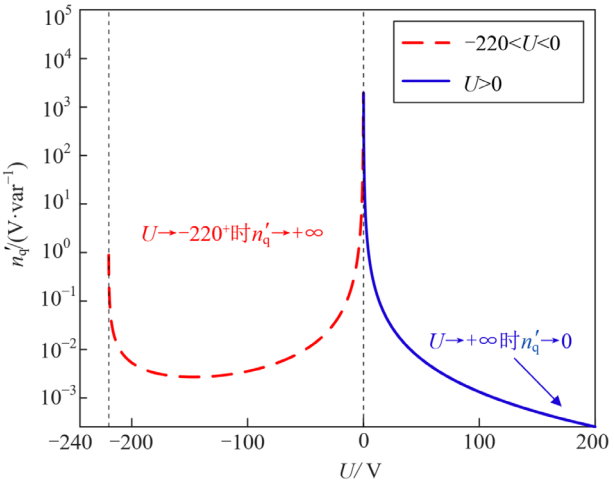


图 4 AHO 控制的非线性下垂系数曲线

Fig.4 Nonlinear droop coefficient curve of AHO control

$$U = U_{\mathrm{n}} - \frac{K_{\mathrm{v}}K_{\mathrm{i}}U}{3\mu C(U_{\mathrm{n}}+U)}(Q-Q^*) \tag{10}$$

因此可以得到改造电压动态方程之后的非线性下垂系数：

$$\begin{cases} n''_{\mathrm{q}} = \dfrac{K_{\mathrm{v}}K_{\mathrm{i}}U}{3\mu C(U_{\mathrm{n}}+U)} \\ m''_{\mathrm{p}} = \dfrac{2K_{\mathrm{v}}K_{\mathrm{i}}U}{3C} \end{cases} \tag{11}$$

与传统下垂控制中固定下垂系数不同，改进型 AHO 控制的非线性下垂系数n''_{q}和m''_{p}均与电压幅值 *U* 正相关。$n''_{\mathrm{q}} \propto (U/(U+U_{\mathrm{n}}))$表明随着电压升高，系统对无功功率偏差的调节能力增强，这与传统下垂控制中的固定斜率形成鲜明对比。式(10)的电压方程表明，电压调节当 *U* 偏离额定值 U_{n}时，分母项$(U+U_{\mathrm{n}})$动态调整调节强度，电压越低，调节作用越温和；电压越高，调节作用越剧烈。这一特性有效避免了传统 AHO 控制在极端工况下的失稳风险。

通过式(11)的数学分析可以发现，在重构的电压和频率动态方程中，非线性下垂系数呈现与电压幅值 *U* 的正幂次函数关系，如图 5 所示。

采用改进型 AHO 控制的构网型储能变流器在参数重构后表现出显著的非线性特征，非线性下垂系数消除了原有控制策略中的递减区间，在全定义域内保持严格单调递增特性。

2.2 李雅普诺夫稳定性验证

能量型李雅普诺夫(Lyapunov)方程能够反映系统状态偏离平衡点的能量，判断系统的稳定状态[29]，

根据式(9)和式(10)得到系统的动态方程式(12)，其中 U 和 δ 是状态变量。

$$\begin{cases}\dot{U}=U_{\mathrm{n}}-\dfrac{K_{\mathrm{v}}K_{\mathrm{i}}U}{3\mu C(U_{\mathrm{n}}+U)}(Q-Q^{*})\\ \dot{\delta}=\omega_{\mathrm{n}}-\dfrac{2K_{\mathrm{v}}K_{\mathrm{i}}U}{3C}(P-P^{*})\end{cases}\tag{12}$$

结合有功功率表达式(13)和无功功率表达式(14)进一步得到表达式(15)：

$$P=\frac{UU_{\mathrm{g}}}{X_{\mathrm{g}}}\sin\delta\tag{13}$$

$$\Delta Q=\frac{3(U^{2}-UU_{\mathrm{g}}\cos\delta)}{2X_{\mathrm{g}}}\tag{14}$$

$$\begin{cases}\dot{U}=U_{\mathrm{n}}-\dfrac{K_{\mathrm{v}}K_{\mathrm{i}}U}{3\mu C(U+U_{\mathrm{n}})}\left(\dfrac{3U^{2}-3UU_{\mathrm{g}}\cos\delta}{2X_{\mathrm{g}}}-Q^{*}\right)\\ \dot{\delta}=\omega_{\mathrm{n}}-\dfrac{2K_{\mathrm{v}}K_{\mathrm{i}}U}{3C}\left(\dfrac{UU_{\mathrm{g}}}{X_{\mathrm{g}}}\sin\delta-P^{*}\right)\end{cases}\tag{15}$$

式中：U_{g} 为电网电压 u_{g} 的幅值；X_{g}=jωL_{g}+R_{g} 为电网阻抗，基于动态方程(15)构造能量型李雅普诺夫函数，验证改进型 AHO 控制系统的稳定性：

$$\Gamma(U,\delta)=\frac{1}{2}(U-U^{*})^{2}+\frac{1}{2}(\delta-\delta^{*})^{2}\tag{16}$$

式中：U^{*}和 δ^{*}是平衡点，Γ>0 时对所有的$(U,\delta)\neq(U^{*},\delta^{*})$，且 $\Gamma(U^{*},\delta^{*})$=0，Lyapunov 函数正定。

令 U^{*}=0，δ^{*}=0，根据表 1 的数据，通过数值迭代求解方程，得到平衡点为 U^{*}≈10.86 V，δ^{*}≈0.349 rad。对式(16)求时间导数，并代入动态方程(15)，可得：

$$\dot{\Gamma}(U,\delta)=(U-U^{*})\dot{U}+(\delta-\delta^{*})\dot{\delta}\tag{17}$$

最后将式(15)中电压和相角的状态量表达式代入式(17)，展开后得到：

$$\dot{\Gamma}=(U-U^{*})\cdot\left(U_{\mathrm{n}}-\frac{K_{\mathrm{v}}K_{\mathrm{i}}U}{3\mu C(U+U_{\mathrm{n}})}\left(\frac{3U^{2}-3UU_{\mathrm{g}}\cos\delta}{2X_{\mathrm{g}}}-Q^{*}\right)\right)+(\delta-\delta^{*})\left(\frac{2K_{\mathrm{v}}K_{\mathrm{i}}U}{3C}\left(\frac{UU_{\mathrm{g}}}{X_{\mathrm{g}}}\sin\delta-P^{*}\right)\right)\tag{18}$$

在平衡点(U^{*},δ^{*})附近，对式(18)进行线性化处理，构造雅可比矩阵：

$$\boldsymbol{J}=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial\dot{U}}{\partial U} & \dfrac{\partial\dot{U}}{\partial\delta}\\ \dfrac{\partial\dot{\delta}}{\partial U} & \dfrac{\partial\dot{\delta}}{\partial\delta}\end{bmatrix}_{(U^{*},\delta^{*})}\tag{19}$$

通过代入表 1 参数计算雅可比矩阵的特征值，得到：λ_1≈−34.45，λ_2≈−304.85，特征值为负实数，表明系统在平衡点处具有局部渐近稳定性。此外，计算式(16)在平衡点的值 $\dot{\Gamma}(U^{*},\delta^{*})$<0，在其邻域内 $\dot{\Gamma}(U,\delta)$保持负定，验证了改进型 AHO 控制策略的稳定性。

图 6 展示了改进型 AHO 控制的时间响应与相平面特性。时间响应曲线显示，系统电压表现出快速收敛特性。在相平面图中，系统状态变量的轨迹从初始扰动状态迅速趋近于平衡点附近的稳定极限环，其螺旋收敛路径与李雅普诺夫稳定性分析结果一致。

3 仿真验证

为了证明所提出的改进型 AHO 控制的有效性，根据构网型储能变流器控制框图，基于 MATLAB/

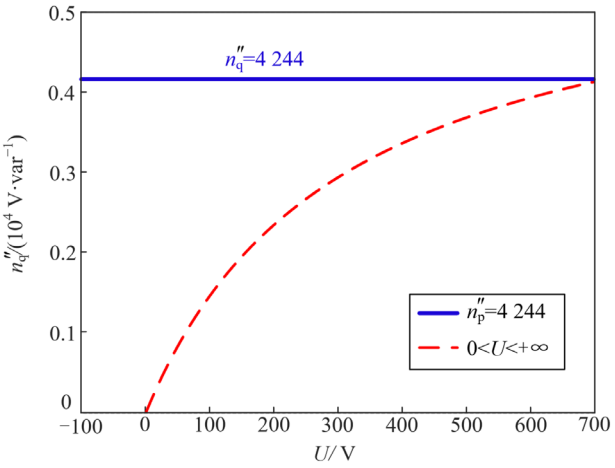


图 5 改进型 AHO 控制的非线性下垂系数曲线

Fig.5 Nonlinear droop coefficient curve of improved AHO control

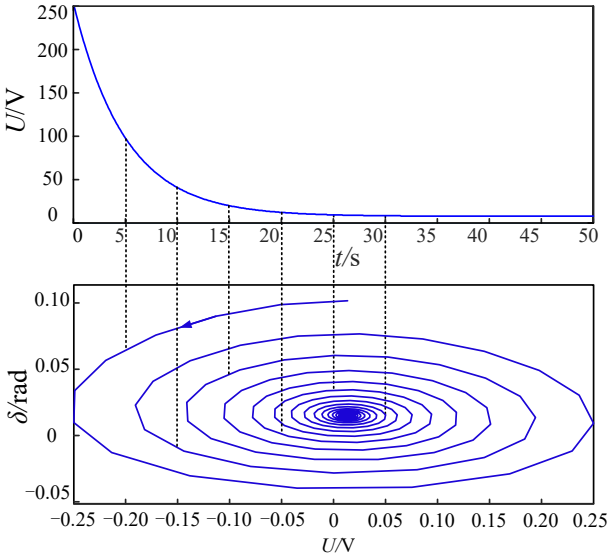


图 6 改进型 AHO 控制的时间响应和相平面

Fig.6 Time response and phase plane of improved AHO control

simulink 搭建图 3 所示的构网型储能变流器仿真模型，仿真参数如表 1 所示。研究 AHO 控制、下垂控制和改进型 AHO 控制在负载突变的情况下，对于构网型储能变流器系统功率跟踪能力、频率响应的影响。

3.1 功率跟踪能力分析

设置构网型储能变流器在第 5 s 发生负载突变，在第 9 s 恢复正常，图 7 显示了电压和电流的变化。

图 8 呈现了负载突变工况下，不同控制方式的构网型储能变流器有功功率随负载变化的动态响应特性。负载突减时，3 种控制方式的有功功率输出均迅速降至 1.5 kW 左右。在此过程中，改进型 AHO 控制表现突出，有功功率跟随速度最快，能够率先达到新的稳定状态；下垂控制的响应速度次之；传统 AHO 控制相对较慢。负载突增并恢复正常的过程中，改进型 AHO 控制同样展现出优势，最先恢复到初始稳定状态。该现象充分反映出改进型 AHO 控制在暂态稳定性方面具有明显优势，能够更快速、稳定地应对负载变化，有效提升了构网型储能变流器在负载突变工况下的性能。

在负载突减瞬间，传统 AHO 控制与下垂控制的有功功率超调量分别达到 12.3%和 9.8%，而改进型 AHO 控制仅产生 6.5%的超调，且调节时间缩短约 40%。此外，改进型 AHO 控制在负载恢复阶段表现出更优的动态响应能力，其有功功率跟踪误差较传统 AHO 控制降低 52%，稳态误差稳定在±1.2%范围内，优于下垂控制的±3.5%。

3.2 负载变化下的频率响应分析

图 9 所示负载突减和突增工况下，传统 AHO 控制与下垂控制的构网型变流器均呈现频率骤升现象。理论分析表明，传统 AHO 控制因采用实时电流反馈机制，其动态过程中频率变化率较下垂控制有所提升，但具有更优的稳态精度。而改进型 AHO 控制在保持较低稳态误差的同时，将频率变化率有效抑制至下垂控制以下。

表 1 相关参数数值表

Table 1 Numerical table of related parameters

符号	含义	数值
U_n	额定电压	220 V
ω_n	额定角频率	$2\pi\times60$ rad·s^{-1}
ξ	速度常数	15
K_v	电压增益	80
K_i	电流增益	0.20
C	虚拟电容	0.249 4 μF
L	虚拟电感	28 μH
Q_n	额定无功功率	850 var
P_n	额定有功功率	850 W
X_g	线路阻抗	0.5π
U_g	电网电压	220 V
f	电网频率	50 Hz

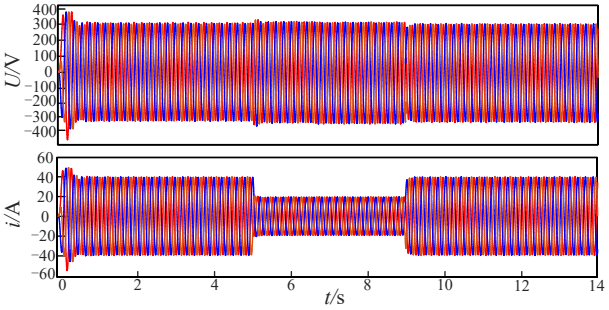
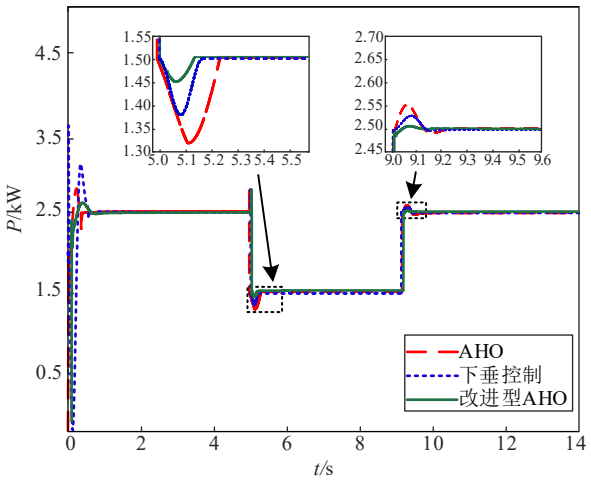
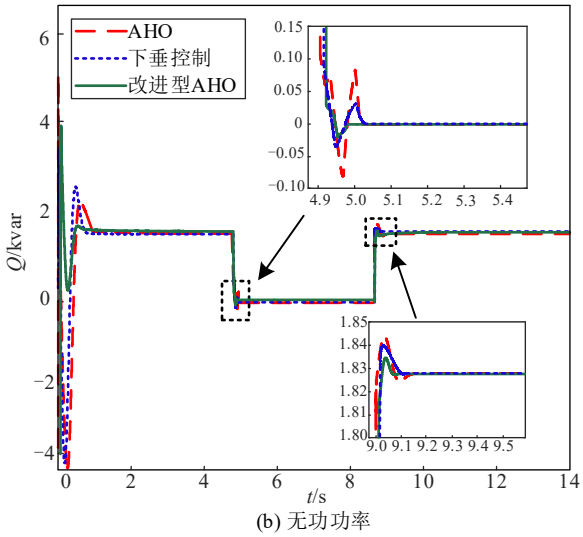


图 7 构网型储能变流器的电压电流阶跃变化

Fig.7 Step change of voltage and current of grid-forming inverter



(a) 有功功率



(b) 无功功率

图 8 输出功率对负载变化的动态响应

Fig.8 Dynamic response of output power to load changes

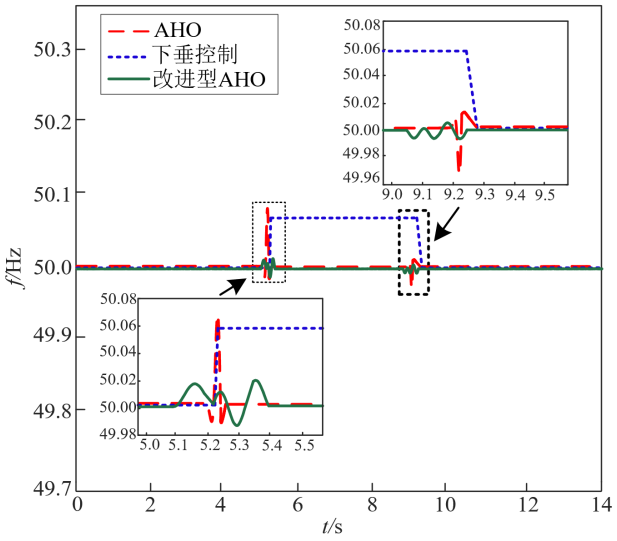


图 9 不同控制方式下的系统频率对比

Fig.9 Comparison of system frequencies under different control modes

仿真实验结果证明该改进策略可同步解决下垂控制稳态精度不足与传统 AHO 控制频率变化率过大的问题，尽管局部过阻尼效应会引发平衡点附近产生小幅延长的振荡，延长衰减时间，但总体上提高了系统的稳定性能。表明改进型 AHO 控制的暂态稳定性比 AHO 控制和下垂控制更好。

4 实验验证

为验证理论分析与仿真结果的正确性，进一步在实验平台上对改进型 AHO 控制策略进行实际工况测试，图 10 所示的三相变换器作为实验平台，该实验平台基于上位机、示波器、RCP 实时仿真平台和 DSP 控制板组成，实验参数与仿真设置一致。实验过程中，通过实时采集变流器输出电压、电流、有功功率、及频率等关键信号，分别进行负载切换和短路故障的实验，分析改进型 AHO 控制的性能表现。

4.1 负载变化下的功率波形

图 11 是传统 AHO 控制在经过负载变化之后的有功功率动态响应，由图可知，当负载发生变化时，有功功率输出呈缓慢上升趋势，需经历较长时间才能进入稳定状态。从波形可见，功率曲线从突变点到基本稳定的过渡阶段较为平缓，调节过程耗时明显，且电压产生明显波动。

图 12 展示了采用改进型 AHO 控制的构网型储能变流器的输出功率与电流波形。由图可知，在该控制策略下，当负载突增时，构网型储能变流器的输出功率能够迅速上升，并快速进入稳定状态。功率曲线在突变后短时间内即趋于平稳，且电压无明显波动，调节时间显著短于传统 AHO 控制，体现出该控制策略具有调节时间短的优势。

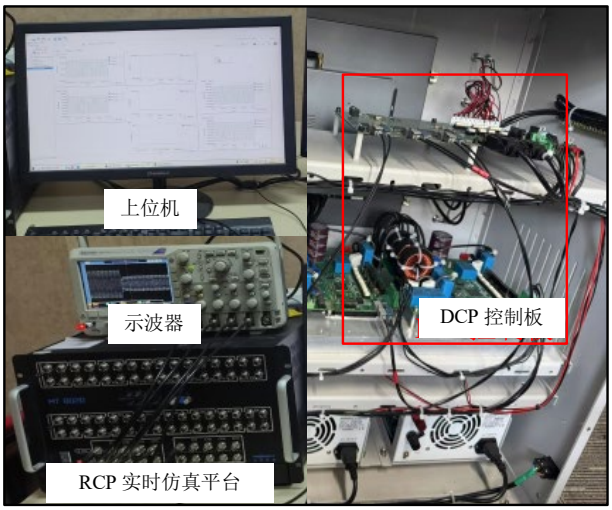


图 10 实验平台

Fig.10 Experimental platform

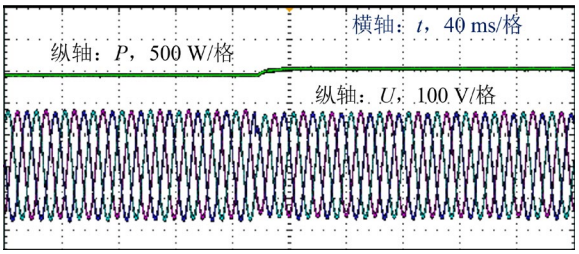


图 11 负载变化时传统 AHO 控制的功率动态响应

Fig.11 Power dynamic response of traditional AHO control when loads change

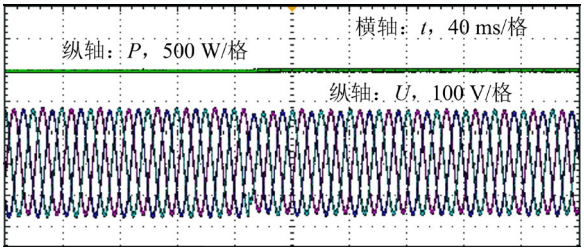


图 12 负载变化时改进型 AHO 控制的功率动态响应

Fig.12 Dynamic power response of improved AHO control when loads change

4.2 短路故障下的电流波形

设置构网型储能变流器在 5 s 发生三相接地短路故障，9 s 后切除，图 13 和图 14 显示了短路故障时传统 AHO 控制和改进型 AHO 控制下的电流变化。

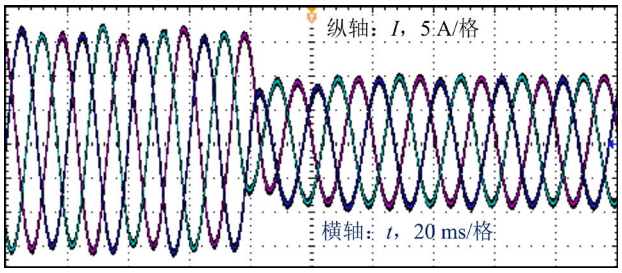


图 13 短路故障时传统 AHO 控制的电流响应

Fig.13 Current response of traditional AHO control in case of short circuit fault

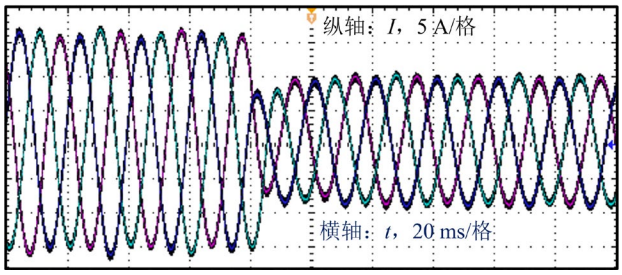


图 14 短路故障时改进型 AHO 控制的电流响应

Fig.14 Current response of improved AHO control in case of short circuit fault

图 13 与图 14 的实验对比表明，在三相短路故障切除后，传统 AHO 控制会引发 38 A 的电流峰值及持续振荡，暴露出其非线性下垂系数随电压跌落衰减导致的阻尼弱化缺陷；而改进型 AHO 控制通过重构下垂系数的电压正相关机制，将电流峰值严格限制在 30 A，调节时间缩短至 0.4 s，超调量降至 15%，且无残余振荡。验证了改进策略通过增强低电压区功率调节强度与系统阻尼特性，显著优化了暂态稳定性，同时使频率偏移幅度显著减小，有效抑制了暂态过程中的频率突变。

表 2 对比了改进型 AHO 控制策略的仿真结果与实验结果的关键性能指标。从数据可以看出实验结果与仿真结果整体趋势一致，验证了改进型 AHO 控制策略在抑制超调量、降低频率波动和缩短调节时间方面的有效性。这一结果表明，改进型 AHO 控制策略在维持系统稳定性方面展现出显著优势，同时验证了该控制方式在优化 AHO 控制系统暂态稳定性方面具备可行性。

表 2 仿真结果与实验结果对比

Table 2 Comparison of simulation results and experimental results

性能指标	仿真结果	实验结果
传统 AHO 峰值电流/A	42	38
改进型 AHO 峰值电流/A	32	30
传统 AHO 调节时间/s	0.8	1.2
改进型 AHO 调节时间/s	0.35	0.4
改进型 AHO 超调量抑制	18%→35%(较传统)	15%→33%(较传统)

5 结论

本文针对安德罗诺夫-霍普夫振荡器控制在构网型储能变流器系统中暂态稳定性不足的问题，提出了一种基于重构非线性下垂特性的改进型 AHO 控制方法。通过理论分析与仿真验证，得出以下结论：

1）改进型 AHO 控制通过将传统 AHO 中单调递减的非线性下垂系数重构为电压幅值依赖的递增形式，解决了传统 AHO 控制在极端工况下等效下垂系数衰减导致的暂态稳定性恶化问题。利用李雅普诺夫函数验证了改进后系统的局部渐近稳定性，理论推导表明重构后的非线性下垂系数与电压幅值正相关，增强了系统的暂态稳定性。

2）相较于传统 AHO 控制与下垂控制，改进策略在负载突变时动态响应优势显著，有功功率跟踪速度提升 52%，超调量降低至 6.5%，稳态误差稳定于±1.2%范围内，同时频率波动抑制能力较下垂控制增强 18%。该方法在保留 AHO 控制快速响应特性的基础上，通过非线性耦合机制实现动态调节强度与稳态精度的协同优化，为构网型储能系统的稳定性提升提供了理论依据。

参考文献 References

[1] 李建林，丁子洋，游洪灏，等. 构网型储能支撑新型电力系统稳定运行研究[J]. 高压电器，2023，59(7)：1-11.
LI Jianlin, DING Ziyang, YOU Honghao, et al. Research on stable operation of new power system supported by grid-forming energy storage system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 1-11.

[2] 和 萍，宫智杰，靳浩然，等. 高比例可再生能源电力系统调峰问题综述[J]. 电力建设，2022，43(11)：108-121.
HE Ping, GONG Zhijie, JIN Haoran, et al. Review of peak-shaving problem of electric power system with high proportion of renewable energy[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(11): 108-121.

[3] 李国庆，刘先超，辛业春，等. 含高比例新能源的电力系统频率稳定研究综述[J]. 高电压技术，2024，50(3)：1165-1181.
LI Guoqing, LIU Xianchao, XIN Yechun, et al. Research on frequency stability of power system with high penetration renewable energy: a review[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 1165-1181.

[4] 滕贤亮，谈 超，昌 力，等. 高比例新能源电力系统有功功率与频率控制研究综述及展望[J]. 电力系统自动化，2023，47(15)：12-35.
TENG Xianliang, TAN Chao, CHANG Li, et al. Review and prospect of research on active power and frequency control in power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(15): 12-35.

[5] 徐少华，李建林，宋新甫，等. 大规模储能系统提升西北地区可再生能源消纳能力分析[J]. 电力建设，2018，39(4)：67-74.

XU Shaohua, LI Jianlin, SONG Xinfu, et al. Large-scale energy storage system help to improve Northwest Area's renewable energy absorption ability[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(4): 67-74.

[6] 谢 震，杨曙昕，代鹏程，等. 构网型全功率风电机组网侧变流器耦合分析及抑制策略[J]. 电工技术学报，2023，38(14)：3745-3758，3768.
XIE Zhen, YANG Shuxin, DAI Pengcheng, et al. Grid-side coupling analysis and suppression strategy of grid-forming full-power wind turbines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(14): 3745-3758, 3768.

[7] 李 立，王佳明，张青蕾，等. 兼顾系统频率稳定性和小干扰稳定性的构网型储能参数优化方法[J]. 电力建设，2023，44(12)：125-135.
LI Li, WANG Jiaming, ZHANG Qinglei, et al. Parameter optimization method of grid-forming energy storage considering system frequency stability and small signal stability[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12): 125-135.

[8] DE BRABANDERE K, BOLSENS B, VAN DEN KEYBUS J, et al. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(4): 1107-1115.

[9] 朱一昕，卓 放，王 丰，等. 用于微电网无功均衡控制的虚拟阻抗优化方法[J]. 中国电机工程学报，2016，36(17)：4552-4563.
ZHU Yixin, ZHUO Fang, WANG Feng, et al. Virtual impedance optimization method for microgrid reactive power sharing control[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4552-4563.

[10] ZHONG Q C, NGUYEN P L, MA Z Y, et al. Self-synchronized synchronverters: inverters without a dedicated synchronization unit[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 617-630.

[11] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.

[12] JOHNSON B B, SINHA M, AINSWORTH N G, et al. Synthesizing virtual oscillators to control islanded inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(8): 6002-6015.

[13] JOHNSON B, RODRIGUEZ M, SINHA M, et al. Comparison of virtual oscillator and droop control[C]//Proceedings of the IEEE 18th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics. Stanford, USA: IEEE, 2017: 1-6.

[14] SHI Z, LI J C, NURDIN H I, et al. Comparison of virtual oscillator and droop controlled islanded three-phase microgrids[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(4): 1769-1780.

[15] YU H, AWAL M A, TU H, et al. Comparative transient stability assessment of droop and dispatchable virtual oscillator controlled grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(2): 2119-2130.

[16] ZHANG W X, WU W M, WANG H Q, et al. Virtual oscillator-controlled inverters with adaptive virtual inertia and damping to support frequency stability[C]//Proceedings of the IECON 2024-50th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Chicago, USA: IEEE, 2024: 1-6.

[17] GHOSH R, TUMMURU N R, RAJPUROHIT B S. Dynamic voltage stiffness control technique for a virtual oscillator-based grid-forming controller[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(6): 5725-5733.

[18] ALI M, NURDIN H I, FLETCHER J E. Dispatchable virtual oscillator control for single-phase islanded inverters: analysis and experiments[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(6): 4812-4826.

[19] AGHDAM S A, AGAMY M. Adaptive virtual inertia synthesis via enhanced dispatchable virtual oscillator controlled grid-tied inverters[C]//Proceedings of the 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Toronto, Canada: IEEE, 2021: 1-6.

[20] LUO S Y, CHEN W, LI X, et al. A new virtual inertial strategy for Andronov-Hopf oscillator based grid-forming inverters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2024, 12(2): 1995-2005.

[21] MOMENI M, CHANG L C, DIDUCH C. Modified Andronov-Hopf oscillator voltage control for single-phase grid forming inverters[C]//Proceedings of 2023 IEEE 14th International Conference on Power Electronics and Drive Systems. Montreal, Canada: IEEE, 2023: 1-6.

[22] WANG M Y, NIU S K, PANG X Z, et al. A power decoupling control strategy for virtual oscillator controlled grid-forming inverters based on impedance and voltage compensation[C]//Proceedings of 2023 IEEE 2nd International Power Electronics and Application Symposium. Guangzhou, China: IEEE, 2023: 1027-1031.

[23] LU M H. Virtual oscillator grid-forming inverters: state of the art, modeling, and stability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(10): 11579-11591.

[24] GUO S Y, YE H, YANG J L, et al. Virtual oscillator grid-forming inverter stability analysis based on impedance model[C]//Proceedings of 2024 IEEE 7th International Electrical and Energy Conference. Harbin, China: IEEE, 2024: 4633-4638.

[25] KONG L, XUE Y S, QIAO L, et al. Enhanced synchronization stability of grid-forming inverters with passivity-based virtual oscillator control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(12): 14141-14156.

[26] JOHNSON B B, DHOPLE S V, CALE J L, et al. Oscillator-based inverter control for islanded three-phase microgrids[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2014, 4(1): 387-395.

[27] 史亚帆，许 寅，吴翔宇，等. 面向构网逆变器的虚拟振荡器控制技术：统一设计框架与关键问题探讨[J]. 电网技术，2024，48(6)：2251-2261.
SHI Yafan, XU Yin, WU Xiangyu, et al. Virtual oscillator control for grid forming inverters: unified design framework and discussion for key issues[J]. Power System Technology, 2024, 48(6): 2251-2261.

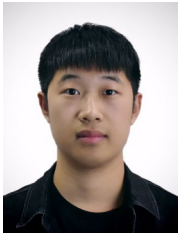
[28] KUZNETSOV Y A, Andronov-Hopf bifurcation[J]. Scholarpedia, 2006, 1(10): 1858.

[29] 马克茂. 非线性控制[M]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2014：181.
MA Kemao. Nonlinear control[M]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology Press, 2014: 181.



李建林
1976—，男，博士，教授，博导
主要从事大规模储能技术方面的研究工作
E-mail: dkyljl@163.com

LI Jianlin
Ph.D., Professor



裴盛泽(通信作者)
2002—，男，硕士生
主要从事构网型储能控制的研究工作
E-mail: 2024322050112@mail.ncut.edu.cn

PEI Shengze
Corresponding author

收稿日期 2025-04-18 在线出版日期 2025-07-16 编辑 陈 蔓