



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2401713

引用格式:何婷, 乔俊强, 吴国栋. 基于小信号模型的虚拟同步机稳定性分析及参数优化[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(5): 1927-1935.

He Ting, Qiao Junqiang, Wu Guodong. Stability analysis and parameter optimization of virtual synchronous machine based on small signal model[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(5): 1927-1935.

能源与动力工程

基于小信号模型的虚拟同步机稳定性分析及参数优化

何婷^{1,2}, 乔俊强^{1,2*}, 吴国栋³

(1. 甘肃自然能源研究所, 兰州 730046; 2. 甘肃太阳能利用重点实验室, 兰州 730046; 3. 国网甘肃省电力公司, 兰州 730046)

摘要 为提高虚拟同步机并网稳定性,提出了一种虚拟同步机控制参数的全局优化设计方法。首先,建立具有虚拟励磁机和调速器的虚拟同步发电机小信号模型,通过求解状态矩阵得到系统的特征值。其次,研究特征值位置对控制器参数的敏感性,并利用遗传算法在主特征值位置的基础上对参数进行大范围优化。最后,将模型的解析计算解和 MATLAB/Simulink 仿真数据进行对比分析,结果表明,通过优化大范围的虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)参数,可以显著提高频率稳定性,参数优化后系统响应瞬态稳定时间为 0.25 s,仅为一般参数时系统响应瞬态稳定时间的 5%,当负载变化时,频率稳定性有明显提高。

关键词 微电网; 虚拟同步发电机; 小信号分析; 灵敏度分析; 参数优化

中图分类号 TK513.5; **文献标志码** A

Stability Analysis and Parameter Optimization of Virtual Synchronous Machine Based on Small Signal Model

HE Ting^{1,2}, QIAO Jun-qiang^{1,2*}, WU Guo-dong³

(1. Gansu Natural Energy Research Institute, Lanzhou 730046, China; 2. Gansu Key Laboratory of Solar Energy Utilization, Lanzhou 730046, China; 3. State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730046, China)

[Abstract] To enhance the grid connection stability of virtual synchronous machines, a global optimization design method for virtual synchronous machine control parameters was proposed. Firstly, a small-signal model of the virtual synchronous generator with virtual exciter and governor was established, and the system eigenvalues were obtained by solving the state matrix. Secondly, the sensitivity of the controller parameters to the position of eigenvalues was studied, and a wide range of parameter optimization was conducted using genetic algorithms based on the main eigenvalue positions. Finally, analytical solutions of the model and MATLAB/Simulink simulation data were compared. The results show that significant improvements in frequency stability can be achieved by optimizing a wide range of virtual synchronous machine parameters. After optimization, the system response transient stability time is 0.25 s, only 5% of the transient stability time with general parameters, and the frequency stability improves noticeably with load changes.

[Keywords] microgrid; virtual synchronous generator; small signal analysis; sensitivity analysis; parameter optimization

随着分布式能源在电力系统中的渗透率日益增加,电网对功率波动和系统故障的敏感性也随之增强,从而对电力系统的稳定性构成了重大挑战^[1]。尤其是独立微电网,因其分布式能源众多且规模较小,更易面临电能质量不佳和系统稳定性问题^[2]。为应对这些挑战,一种新型的控制策略——

虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)应运而生^[3-4]。VSG 控制通过模拟同步发电机的惯性、阻尼和下垂特性,能够在独立微电网中频率和电压异常时主动参与调频和调压。这种控制方法有助于提升微电网的系统稳定性和动态性能,因此受到国内外学者的广泛关注,将在微电网中发挥重要作用

收稿日期: 2024-03-12 修订日期: 2024-11-16

基金项目: 甘肃省青年科技基金计划(22JR11RA216); 兰州市人才创新创业项目(2021-RC-78)

第一作者: 何婷(1987—),女,汉族,甘肃民勤人,硕士,助理研究员。研究方向:光伏发电技术。E-mail: heting@gneri.com.cn。

*通信作者: 乔俊强(1979—),男,汉族,甘肃兰州人,博士,研究员。研究方向:新能源系统。E-mail: qiao@gsas.ac.cn。

用^[5-6]。自 VSG 控制策略提出以来,已有众多学者对其建模和分析进行了大量研究,取得了许多重要成果。文献[7]提出基于频率扰动的微网预同步控制,利用 VSG 控制和有功无功功率控制共用电流内环,实现外环参考电流平滑过渡。文献[8]考虑了 VSG 动态响应性能,提出了更为完整的有功环和无功环控制参数设计方案。通过波特图和零极点分布图分析了控制参数变化对有功环稳态性能和动态性能的影响,以及对无功环的影响。文献[9]提出了一种等效同步发电机降阶方法,将独立微电网系统等效为改进的三阶同步发电机,其状态变量具有等效物理意义且有利于微电网群的二次控制设计。

除了控制策略外,研究者还致力于 VSG 控制参数的设计和优化,以满足最大系统稳定性的条件^[10-11],VSG 控制参数优化多采用智能算法及解析计算方法。文献[12]针对一个包含两台同步发电机和三台 VSG 的五机微电网系统,以 VSG 特征值实部、阻尼比和发电机电压角偏差为优化目标,应用粒子群算法进行控制参数优化。文献[13]研究了一个包含一台柴油发电机和两台 VSG 的三机九节点微电网系统,将频率振荡过程中系统消耗的动能作为优化目标,通过遗传算法进行参数优化,改善了微电网系统在受扰动后惯性中心频率的动态响应,提高了频率稳定性。文献[14]利用节点导纳矩阵建立了一个电力系统小信号模型,提出了一种基于 H2 范数的虚拟惯量解析优化方法,提高了低惯量电力系统的稳定性。但该方法无法明确表达系统频率电压变化与负荷功率波动之间的关系,不利于 VSG 控制参数优化设计。文献[15]以虚拟惯量控制参数为优化变量,建立惯量优化分布模型,并利用基于灵敏度分析的牛顿法求解模型,实现电力系统中虚拟惯量优化配置。

目前针对独立微电网 VSG 单机建立小信号模

型并在其基础上给出 VSG 控制参数取值范围的研究仍然不多。现对文献[16]中描述的 VSG 控制系统设计进行扩展,增加虚拟励磁(virtual excitation, VE)和虚拟汽轮机调速器(virtual turbine governor, VTG),其动态响应可以完全模拟同步发电机特性,并给出驱动电路和逆变器的小信号模型。研究虚拟同步发电机、励磁机和调速器的特征值对参数变化的敏感性。根据特征值确定稳定区域,计算参数灵敏度,最终得出参数整定的理论依据。尽可能地影响系统稳定性的主要参数进行优化。

1 数学建模

1.1 逆变器与滤波器数学模型

图 1 表示了三相逆变器通过 LC 滤波器和耦合阻抗与负载的连接方式,该系统包括三相桥式逆变电路、滤波器、输电线路和 VSG 控制器。LC 滤波器及线路阻抗的动态特性的方程如下。

$$\begin{cases} \frac{dI_{dq}}{dt} = -\frac{R_f}{L_f}I_{dq} \pm \omega I_{qd} + \frac{1}{L_f}(V_{dq} - E_{dq}) \\ \frac{dE_{dq}}{dt} = \pm \omega E_{qd} + \frac{1}{C_f}(I_{ldq} - I_{dq}) \\ \frac{dI_{dq}}{dt} = -\frac{R_e}{L_e}I_{dq} \pm \omega I_{qd} + \frac{1}{L_e}(E_{dq} - V_{odq}) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: V_{dq} 、 E_{dq} 和 V_{odq} 分别为逆变器的调制波 u 、端电压 e_t 和公共耦合点处电压 V_o 。在 $\omega-\varphi$ 为参考频率和相位的旋转坐标系下的 dq 轴分量; L_f 、 C_f 、 R_f 分别为滤波电感、滤波电容及电阻; R_e 、 L_e 分别为逆变器与公共耦合点之间的线路电阻与电感; I_{ldq} 、 I_{dq} 为流过 LC 滤波器电感电流 I_l 与流过线路电流 I 的 dq 轴分量。

逆变器在 dq 坐标下的输出电压为

$$\frac{d}{dt}V_{dq} = \frac{1}{T_{inv}}(-V_{dq} + m_{dq}k_{inv}V_{dc}) \quad (2)$$

式(2)中: m_{dq} 为逆变器占空比的 dq 轴分量; V_{dc} 为

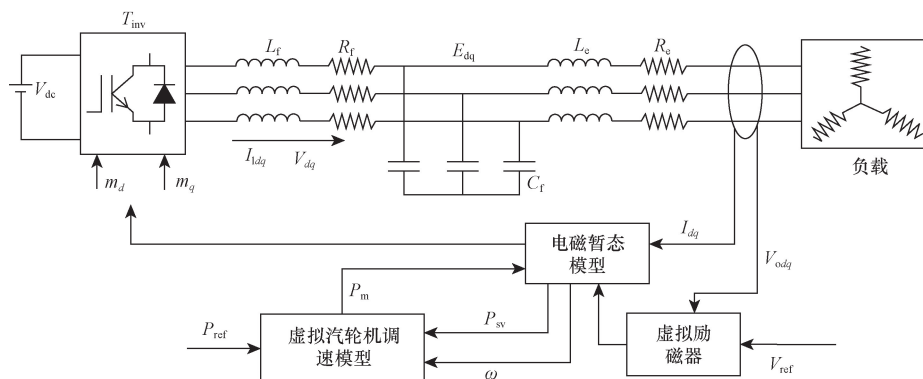


图 1 VSG 主电路拓扑

Fig. 1 VSG topology circuit

逆变器输入直流电压; k_{inv} 和 T_{inv} 分别为逆变器开关电路的增益和时间常数。

1.2 同步发电机数学模型

为了准确描述同步发电机的动态运行特性,采用同步发电机的四阶模型,如式(3)~式(6)所示。

$$\frac{d}{dt}E_{qd} = \frac{1}{T_{d0}} \left[-E_{qd} - \frac{(x_d - x_{dd})I_d}{I_{\text{base}}} + E_{fd} \right] \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt}E_{dd} = \frac{1}{T_{q0}} \left[-E_{dd} - \frac{(x_q - x_{qd})I_q}{I_{\text{base}}} \right] \quad (4)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega \quad (5)$$

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = P_m - \left[\frac{E_{qd}I_q}{I_{\text{base}}} + \frac{E_{dd}I_q}{I_{\text{base}}} - \frac{(x_{dd} - x_{qd})I_dI_q}{I_{\text{base}}^2} \right] + \frac{D\Delta\omega}{J} \quad (6)$$

式中: E_{qd} 、 E_{dd} 分别为 dq 轴暂态电势; x_d 、 x_q 为 dq 轴同步电抗; x_{dd} 、 x_{qd} 为 dq 轴暂态电抗; T_{d0} 、 T_{q0} 为 dq 轴开路暂态时间常数; ω 为转子转速; δ 为功角; J 为转动惯量; D 为阻尼系数; I_{base} 为电流基准值。

励磁系统数学模型使用简单的一阶模型实现,表达式为

$$\frac{d}{dt}E_{fd} = \frac{1}{T_a} \left[-E_{fd} + K_a \left(V_{\text{ref}} - \sqrt{\frac{V_{od}^2}{V_{\text{base}}^2} + \frac{V_{oq}^2}{V_{\text{base}}^2}} \right) \right] \quad (7)$$

式(7)中: E_{fd} 为励磁电势; T_a 为励磁机时间常数; K_a 为 VE 增益; V_{ref} 为参考电压; V_{base} 为电压基准值。

汽轮机调速器数学模型表达式为

$$\frac{d}{dt}P_{sv} = \frac{1}{T_{sv}} \left(-P_{sv} + P_{\text{ref}} - \frac{\Delta\omega}{R_d} \right) \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt}P_m = \frac{1}{T_{ch}} \left(-P_m + P_{sv} \right) \quad (9)$$

式中: P_{sv} 为中间状态变量; T_{sv} 和 T_{ch} 分别为速度继电器的时间常数和伺服电机的惯性时间常数。

逆变器占空比为

$$\begin{cases} m_d = E_{dd} - \frac{I_q x_{qd}}{I_{\text{base}}} - \frac{I_d R_{sg}}{I_{\text{base}}} \\ m_q = E_{qd} + \frac{I_d x_{dd}}{I_{\text{base}}} - \frac{I_q R_{sg}}{I_{\text{base}}} \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中: dq 轴坐标系下电流、电压的基准值为 $V_{\text{base}} = V_{\text{nom}} \sqrt{2/3}$, $I_{\text{base}} = 2S_{\text{base}}/V_{\text{base}}$, V_{nom} 为三相逆变器的线电压。

1.3 负载模型

dq 轴坐标下负载的电流和电压关系为

$$\begin{cases} V_{od} = I_d R_L - I_q X_L \\ V_{oq} = I_d X_L + I_q R_L \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} R_L = \frac{P_L}{3I_{\text{nom}}^2} \\ X_L = \frac{Q_L}{3I_{\text{nom}}^2} \end{cases} \quad (12)$$

式中: R_L 和 X_L 分别为负载的阻抗和感抗; P_L 和 Q_L 分别为负载的有功功率和无功功率; $I_{\text{nom}} = S_{\text{base}}/(\sqrt{3}V_{\text{nom}})$ 。

1.4 线性化和特征值分析

小信号稳定性分析通过将电力系统的非线性模型转化为线性模型来研究系统的动态响应。这个过程简化了对复杂电力系统的分析,使其更易于分析系统的特性。具体步骤包括:①使用非线性微分方程对电力系统进行建模;②选取系统的一个稳定工作点,并在此点附近对模型进行线性化。这样使得原本复杂的系统被转化为更易于分析的线性模型。

电力系统非线性模型通常由状态方程组来描述,表达式为

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = F(\mathbf{X}) \quad (13)$$

式(13)中: \mathbf{X} 为系统状态向量。

将上述非线性方程在平衡点附近线性化,假设 $\Delta\mathbf{X}$ 是状态变量在平衡点附近的一个微小的扰动,那么状态方程展开成泰勒级数的形式可以表示为

$$\frac{d(\mathbf{X}_e + \Delta\mathbf{X})}{dt} = F(\mathbf{X}_e) + \left. \frac{dF(\mathbf{X}_e)}{d\mathbf{X}} \right|_{\mathbf{X}=\mathbf{X}_e} \Delta\mathbf{X} + R(\Delta\mathbf{X}) \quad (14)$$

令 $\left. \frac{dF(\mathbf{X}_e)}{d\mathbf{X}} \right|_{\mathbf{X}=\mathbf{X}_e} = \mathbf{A} = [a_{ij}]_{n \times n}$, 矩阵中的元素

$a_{ij} = \left. \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right|_{\mathbf{X}=\mathbf{X}_e}$, 此时 $\left. \frac{dF(\mathbf{X}_e)}{d\mathbf{X}} \right|_{\mathbf{X}=\mathbf{X}_e} = 0$, $F(\mathbf{X}_e) = 0$, 舍去

变换过程中产生的二次项及高阶项 $R(\Delta\mathbf{X})$, 式(14)可以表示为

$$\frac{d\Delta\mathbf{X}}{dt} = \Delta\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\Delta\mathbf{X} \quad (15)$$

对虚拟同步发电机系统进行小信号稳定性分析,需要对系统中每一个动态的元器件进行建模,然后将该模型在其稳定运行点处作线性化处理。由所建立的模型可知,虚拟同步发电机控制系统共有 15 个状态变量,记为 x , 现将其包含有小干扰的形式表示为

$$\Delta\mathbf{x} = [\Delta V_d, \Delta V_q, \Delta I_{ld}, \Delta I_{lq}, \Delta E_d, \Delta E_q, \Delta I_d, \Delta V_q, \Delta E_{dd}, \Delta E_{qd}, \Delta\delta, \Delta\omega, \Delta E_{fd}, \Delta P_{sv}, \Delta P_m] \quad (16)$$

根据李雅普诺夫稳定性判据,系统的稳定性可以通过计算状态矩阵 \mathbf{A} 的特征值来分析。如果系

统所有特征值的实部都是负值,那么系统被认为是渐近稳定的。根据实践经验,阻尼比应为正且大于预先指定的值,通常阻尼比应高于 0.05。如果至少有一个特征值具有正实部,则系统被认为是不稳定的。本研究中方程的线性化是通过确定零初始条件点附近的状态矩阵来实现,状态矩阵如式(17)所示。式(17)中: $a_1 = (I_d X_L + I_q R_L)/V_{base}$, $b_1 = (I_d R_L - I_q X_L)/V_{base}$ 。

2 优化目标和解决方案

2.1 优化目标

为了评估虚拟同步机并网系统在各种参数组合下的稳定性,构建了一个目标函数,该函数基于系统特征值的实部和虚部与系统振荡模式的频率及

阻尼比之间的关系。系统的小干扰稳定性要求特征值的实部必须为负,在这个基础上,为了增强系统各振荡模式的阻尼比,需要特征值实部的绝对值最大化并设定一个阈值。同时,为了减少虚拟同步机并网系统的振荡频率并缩短暂态过渡期间的振荡周期,需要特征值虚部的绝对值最小化。这样,通过精确调整这些指标,可以有效提升系统的整体稳定性。综合确定控制参数优化中的小干扰稳定性定量目标函数为

$$\begin{cases} J = \max \sum_{i=1}^N \alpha [\operatorname{Re}(\lambda_i)]^2 - \beta [\operatorname{Im}(\lambda_i)]^2 \\ \operatorname{Re}(\lambda_i) \leq 0 \end{cases} \quad (18)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta V_{id} \\ \Delta V_{iq} \\ \Delta I_{id} \\ \Delta I_{iq} \\ \Delta V_{od} \\ \Delta V_{oq} \\ \Delta I_{od} \\ \Delta I_{oq} \\ \Delta E_{qd} \\ \Delta E_{qd} \\ \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E_{id} \\ \Delta P_{sv} \\ \Delta P_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{inv}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{inv} R_{sg} V_{dc}}{I_{base} T_{inv}} & -\frac{K_{inv} V_{dc} x_{gy}}{I_{base} T_{inv}} & 0 & \frac{K_{inv} V_{dc}}{T_{inv}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_{inv}} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{inv} V_{dc} x_{gd}}{I_{base} T_{inv}} & -\frac{K_{inv} R_{sg} V_{dc}}{I_{base} T_{inv}} & \frac{K_{inv} V_{dc}}{T_{inv}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{L_f} & 0 & \frac{R_f}{L_f} & \omega & -\frac{1}{L_f} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} & -\omega & -\frac{R_f}{L_f} & 0 & -\frac{1}{L_f} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_f} & 0 & 0 & \omega & -\frac{1}{C_f} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_f} & -\omega & 0 & 0 & -\frac{1}{C_f} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_c} & 0 & -\frac{R_L}{L_c} - \frac{R_c}{L_c} & \omega + \frac{X_L}{L_c} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_c} & -\omega - \frac{X_L}{L_c} & -\frac{R_L}{L_c} - \frac{R_c}{L_c} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{x_d - x_{dd}}{I_{base} T_{ad}} & 0 & -\frac{1}{T_{ad}} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{ad}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{x_q - x_{qq}}{I_{base} T_{qd}} & 0 & -\frac{1}{T_{qd}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{E_{dd} + I_q(x_{dd} - x_{qq})}{I_{base} I_{base}^2} & -\frac{E_{qd} + I_d(x_{dd} - x_{qq})}{I_{base} I_{base}^2} & -\frac{I_q}{I_{base} J} & -\frac{I_d}{I_{base} J} & 0 & -\frac{D}{J} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_a(b_1 R_L + a_1 X_L)}{V_{base} T_n \sqrt{a_1^2 + b_1^2}} & -\frac{K_a(a_1 R_L - b_1 X_L)}{V_{base} T_n \sqrt{a_1^2 + b_1^2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_n} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_d T_{sv}} & 0 & -\frac{1}{T_{sv}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{ch}} - \frac{1}{T_{ch}} \end{bmatrix}$$

式(18)中: λ_i 为系统的第 i 个特征值; $\text{Re}(\lambda_i)$ 和 $\text{Im}(\lambda_i)$ 分别为 λ_i 的实部和虚部; α 和 β 分别为 λ_i 实部和虚部的权重。

考虑虚拟同步机并网系统根轨迹分析结果以及系统特征值实部约束,可得优化目标函数的约束条件如下。

$$\begin{aligned} T_{d0q0,\min} &\leq T_{d0q0} \leq T_{d0q0,\max}; x_{qd,\min} \leq x_{qd} \leq x_{qd,\max}; \\ D_{\min} &\leq D \leq D_{\max}; R_{sg,\min} \leq R_{sg} \leq R_{sg,\max}; \\ K_{a,\min} &\leq K_a \leq K_{a,\max}; T_{a,\min} \leq T_a \leq T_{a,\max}; \\ T_{sv,\min} &\leq T_{sv} \leq T_{sv,\max}; T_{ch,\min} \leq T_{ch} \leq T_{ch,\max}; \\ x_{dd,\min} &\leq x_{dd} \leq x_{dd,\max}; J_{\min} \leq J \leq J_{\max}; R_{d,\min} \leq R_d \leq R_{d,\max} \end{aligned}$$

根据系统的特征值轨迹获得每个参数的最小值和最大值。

2.2 优化求解算法

在面临复杂的虚拟同步机并网系统特征根优化和约束问题时,传统优化方法可能难以奏效。因此,采用遗传算法来解决控制器参数的优化问题。遗传算法是一种模仿生物遗传和进化机制的高效启发式搜索方法。这个算法以一组可能的解决方案开始,通过迭代过程在每一代中复制这些解决方案。解决方案的选择基于适应度评估,随后通过突变和交叉操作生成下一代。这个过程重复进行,随着迭代次数的增加,全局最优解以很大的概率被发现。遗传算法具备并行性、随机性、全局搜索能力和自适应特性,使其成为解决复杂非线性优化问题的理想选择。

3 参数敏感性分析

通过分析 VSG 系统的特征值轨迹,得到系统的稳定范围和特征值的变化。研究虚拟同步机参数、虚拟励磁机和调速器参数变化的敏感性,以确定重要的、有影响的参数。在图 2 中,圆圈越大表示参数的值越高,在所有特征值中只考虑主导极点。对参数敏感性分析分为以下三类。

3.1 虚拟同步机参数

虚拟同步机参数包括: T_{d0} , T_{q0} , x_d , x_q , x_{dd} , x_{qd} , J , D 和 R_{sg} 。较低的 J 和 T_{d0} 导致了系统的不稳定性;然而较高的 x_{dd} 、 x_{qd} 、 R_{sg} 使系统容易发生不稳定性,阻尼因子 D 对系统稳定性的影响不明显。

3.2 虚拟励磁参数

虚拟励磁参数包括 K_a 和 T_a , K_a 对系统的稳定性影响没有 T_a 明显,励磁机时间常数 T_a 的增加使极点向 s 平面的右半部分移动,使系统更加不稳定。

3.3 虚拟调速器参数

虚拟调速器参数包括: T_{sv} , T_{ch} 和 R_d 。尽管虚

拟调速器参数 T_{sv} 、 T_{ch} 变化的影响几乎没有改变特征值的位置,但参数值越高,系统就越容易振荡和不稳定,更容易失稳,而较小的下垂系数 R_d 导致主极点位于右侧,从而导致系统不稳定。

4 仿真分析

使用 Python 的 Scipy 线性代数库求解线性化方程组的特征值,类似地使用 Scipy 积分库的 ODE 求解器求解非线性微分方程组,微分方程的特征值分析和数值求解时选取的参数如表 1 所示,通过遗传算法求解的各参数的最优值如表 2 所示。图 3 为基于 VSG 的逆变器中一般参数和最优参数的稳态点主特征值的位置,最优参数能够将主特征值移到平面的更左侧,从而提高系统的相对稳定性。因此,优化后的参数通过减少超调来提高系统的稳定性和瞬态响应。

表 1 VSG 单机负荷独立微电网系统参数
Table 1 VSG single machine load independent microgrid system parameters

参数	数值	参数	数值		
滤波器参数	L_f	4 mH	励磁机参数	T_a	0.05
	R_f	0.05 Ω		K_a	24
	C_f	3 μF		V_{ref}	1
	R_e	0.05 Ω	调速器参数	T_{sv}	0.05
	L_e	2.4 mH		T_{ch}	0.05
虚拟同步机参数	x_d	1.56	R_d	0.005	
	x_{dd}	0.296	P_{ref}	1	
	x_q	2	逆变器参数	V_{dc}	100 $\sqrt{2}$
	x_{qd}	0.4		T_{inv}	0.000 1
	T_{d0}	3.7	K_{inv}	0.5	
	T_{q0}	0.6	负载参数	R_L	128 Ω
	J	40		X_L	96 Ω
	D	0.2	T_s	0.000 01	
	ω	314	f_s	10 kHz	
	基准值	S_{base}	1 000 VA	仿真参数	P_{Load}
V_{nom}		400 V	Q_{Load}		600 Var
I_{base}		6.12 A	solver		Ode23tb

表 2 全局优化控制参数

Table 2 Global optimization control parameters

参数	数值	参数	数值	参数	数值
T_{d0}	1.475 2	x_{qd}	0.017 32	R_d	0.005 79
T_{q0}	0.403 5	J	5.717	T_{ch}	0.000 122
x_d	0.063 5	D	0.979	T_{sv}	0.000 143
x_q	2.944 9	R_{sg}	0.969	T_a	0.000 103
x_{dd}	0.005 8	K_a	1.7		

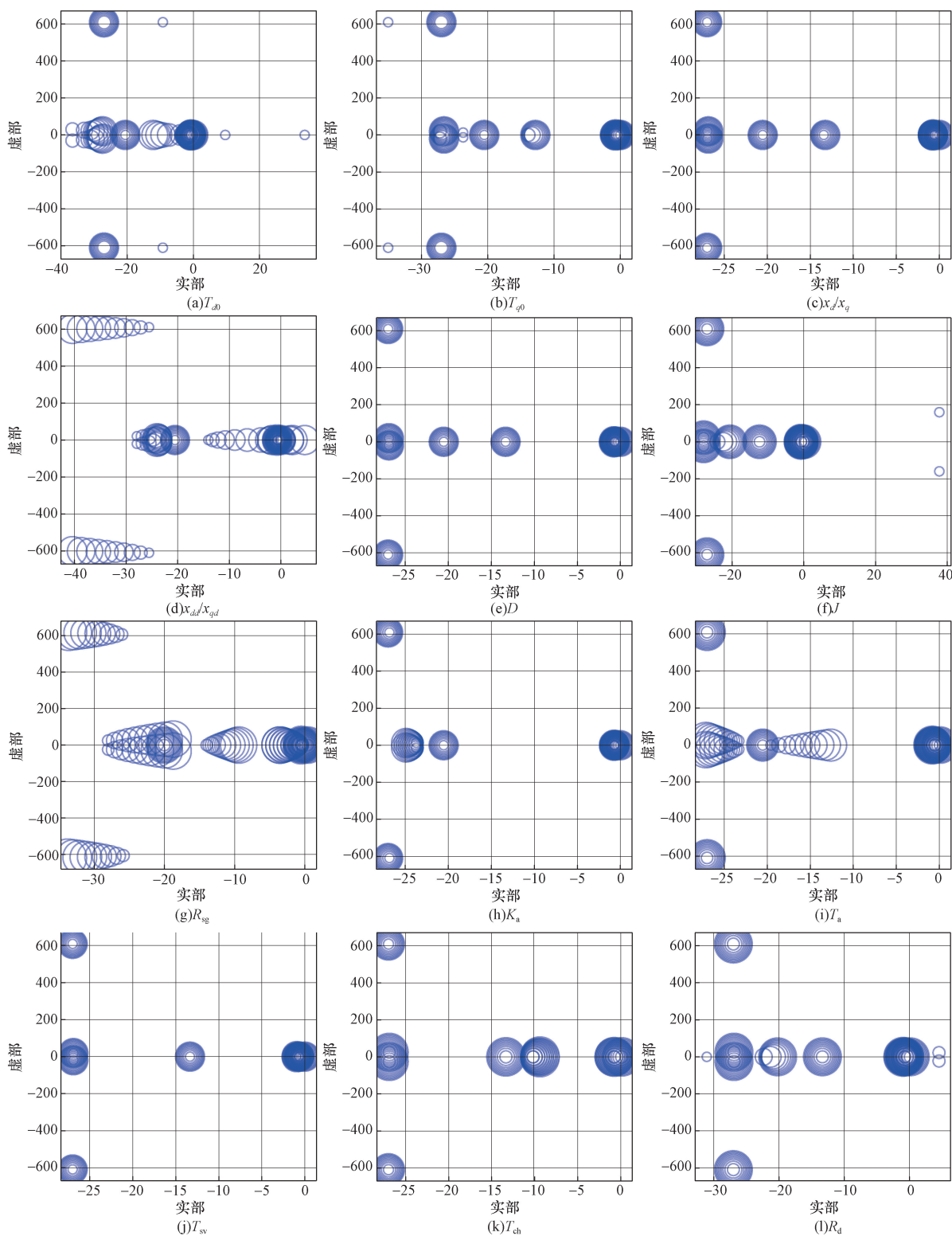


图2 特征值灵敏度分析

Fig. 2 Eigenvalue sensitivity analysis

4.1 一般参数值

图4 将使用 ODE 求解器获得的 VSG 方程组解与 Simulink 中带有开关器件的逆变器仿真模拟结果进行对比分析,两种解决方案有相似的响应,由于逆变器和 VE 存在增益,因此在 Simulink 中模

拟时,逆变器的负载电压和电流存在轻微的过冲现象;同时由于 VSG、滤波器、耦合电抗和负载的耦合关系,系统角频率存在振荡,观察到约 0.6% 的系统频率偏差,系统频率的瞬态稳定时间约为 5 s。

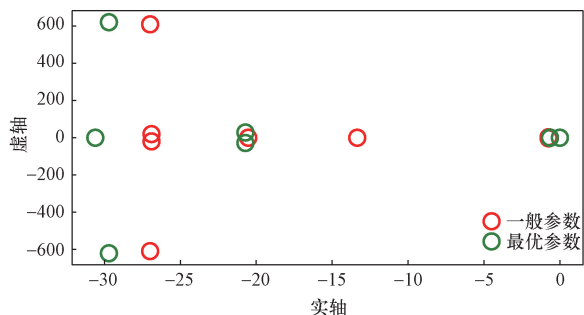
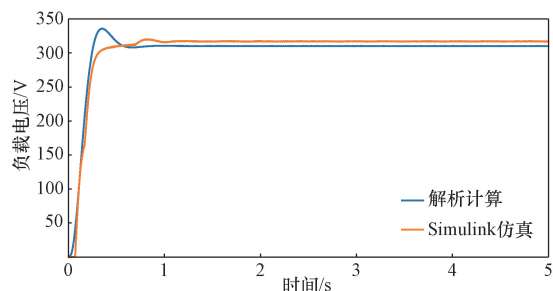
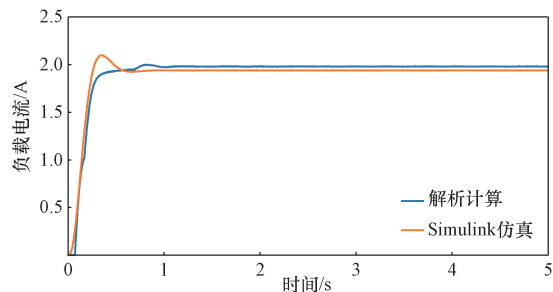


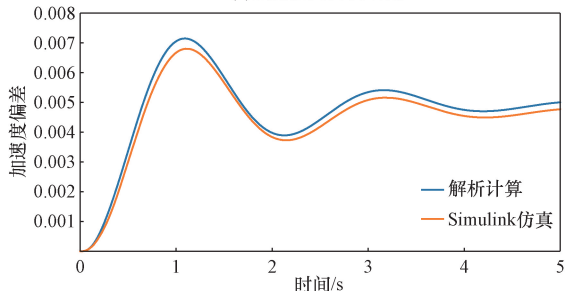
图3 一般参数和最优参数的稳态点主特征值的位置
Fig. 3 The position of the principal eigenvalues of the steady-state points of the general and optimal parameters



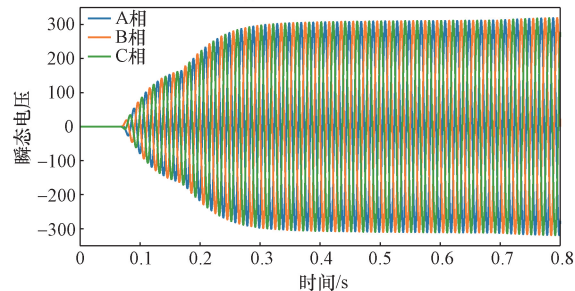
(a)逆变器的负载电压



(b)逆变器的负载电流



(c)虚拟角速度偏差

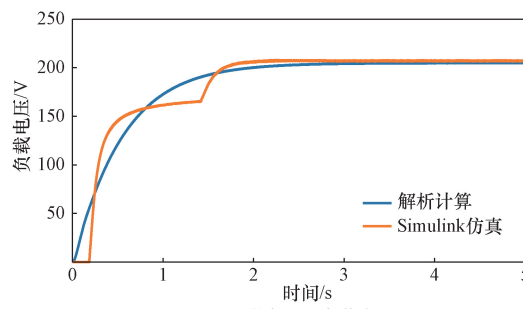


(d)一般参数下负载三相电压

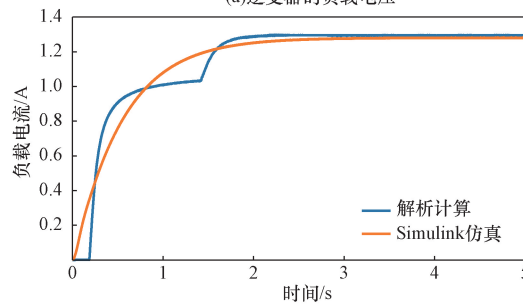
图4 一般参数下常微分方程解与 Simulink 仿真比较
Fig. 4 Comparison of solutions to ordinary differential equations under general parameters and Simulink simulation

4.2 优化参数值

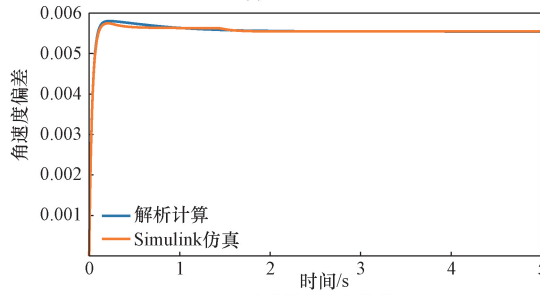
图5 采用表2 中全局最优参数对线性化的方程进行优化,以实现系统稳定性的最大化。采用优化参数使系统的主导极点向左移动,因此减少了系统角频率的过冲和振荡,如图5(c)所示。优化参数改善了系统频率的瞬态响应和稳态响应,系统频率的瞬态稳定时间约为 0.25 s,仅为一般值时所需时间的5%。同时采用最优值求解时,逆变器的负载电压电流值的超调明显改善,但系统频率稳定性的提高影响了电压响应,负载电压的稳定时间和稳态响应略有增加,这种现象可以通过改变 VE 回路参数或



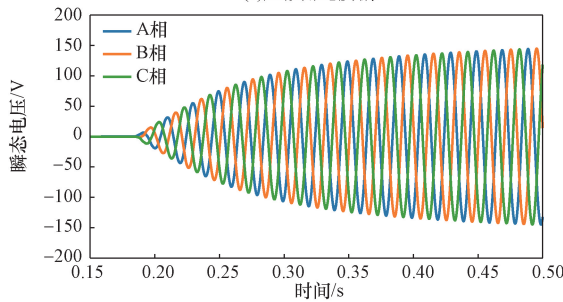
(a)逆变器的负载电压



(b)逆变器的负载电流



(c)虚拟角速度偏差

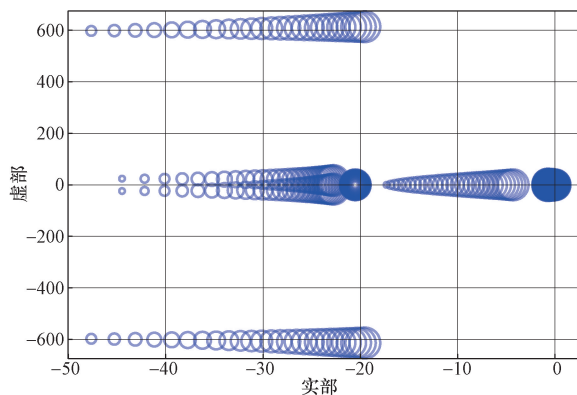


(d)全局优化参数下负载三相电压

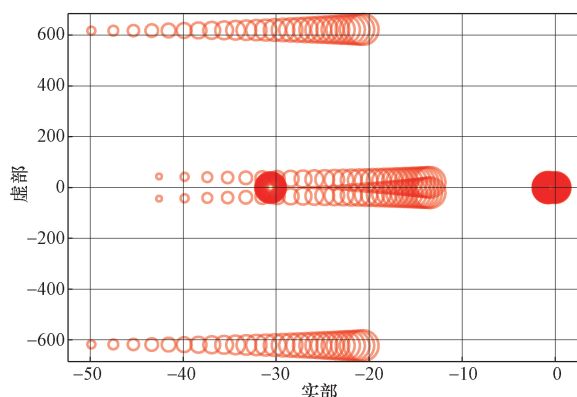
图5 全局优化参数下常微分方程解与 Simulink 仿真比较
Fig. 5 Comparison of solution to ordinary differential equation under global optimization parameters and Simulink simulation

参考电压改善负载电压响应。

图 6(a) 显示了系统中负载变化时主特征值轨迹, 负载变化为基本负载的 $\pm 40\%$ 时, 当采用一般参数时, 系统振荡随着负载的增加而增加; 然而由于特征值向右移动, 因此较低的负载导致低振荡。与最优条件相比, 如图 6(b) 所示, 一般值条件下的特征值更向右移动。



(a) 一般参数值条件下负荷变化时特征值灵敏度



(b) 全局优化值条件下负荷变化时特征值灵敏度

图 6 负荷变化时特征值灵敏度分析

Fig. 6 Sensitivity analysis of eigenvalues when load changes

5 结论

(1) 对改进的 VSG 进行了数学建模、参数灵敏度分析和优化, 为了优化系统稳定性, 考虑了 VSG 的几个参数, 包括 VE、汽轮机和调速器。采用数学求解法和 Simulink 对一般参数和最优参数时逆变器负载电压、电流、虚拟角速度仿真表明, 优化后的参数有效地提高了系统的动态性能。

(2) 对系统进行了最大程度的参数优化, 使特征值尽可能位于稳定区域, 同时最小化阻尼频率。为分析基于 VSG 的独立逆变器的参数优化提供了依据。

(3) 虽然研究聚焦于系统频率稳定性问题, 并在提升频率稳定性方面取得成效, 但这可能影响到系统的稳定时间和稳态响应。因此, 未来的研究可

以考虑基于电压稳定性极限, 对励磁机参数进行进一步的优化, 以平衡不同方面的性能。

参考文献

- [1] 谢黎龙, 李勇汇, 肖金星, 等. 基于改进虚拟同步机的风储微网综合控制[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(22): 9660-9668.
Xie Lilong, Li Yonghui, Xiao Jinxing, et al. Integrated control of wind storage microgrid based on improved virtual synchro [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22 (22): 9660-9668.
- [2] 赵恩盛, 韩杨, 周思宇, 等. 微电网惯量与阻尼模拟技术综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1413-1428.
Zhao Ensheng, Han Yang, Zhou Siyu, et al. Review and prospect of inertia and damping simulation techniques for microgrids [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1413-1428.
- [3] 杨银国, 戴耀辉, 陆秋瑜, 等. 虚拟同步发电机暂态全局稳定分析与阻尼调制方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2505-2516.
Yang Yinguo, Dai Yaohui, Lu Qiuyu, et al. Transient global stability analysis and damping modulation method of virtual synchronous generator [J]. High Voltage Technology, 2023, 49 (6): 2505-2516.
- [4] 吕聪, 何山, 王维庆, 等. 基于线性自抗扰与重复控制的虚拟同步发电机并网逆变器控制策略[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(36): 15460-15468.
Lü Cong, He Shan, Wang Weiqing, et al. Control strategy of grid-connected inverter for virtual synchronous generator based on linear active disturbance rejection and repetitive control [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 21(36): 15460-15468.
- [5] 潘欢, 杨国庆, 赵莹萍, 等. 基于自适应虚拟同步发电机的多端高压直流输电系统协调控制[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(5): 1946-1954.
Pan Huan, Yang Guoqing, Zhao Yingping, et al. Coordinated control of multi-terminal HVDC transmission system based on adaptive virtual synchronous generator [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 24(5): 1946-1954.
- [6] Ratnam K S, Palanisamy K, Yang G. Future low-inertia power systems: requirements, issues, and solutions: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 124: 109773.
- [7] 王浩, 郝正航, 陈卓, 等. 基于虚拟同步发电机的储能逆变器控制策略及无缝切换技术[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(9): 3594-3600.
Wang Hao, Hao Zhenghang, Chen Zhuo, et al. Control strategy and seamless switching Technology of energy storage inverter based on virtual synchronous generator [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(9): 3594-3600.
- [8] 盛万兴, 吕志鹏, 崔健, 等. 虚拟同步机运行区域计算与参数分析[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1557-1565.
Sheng Wanxing, Lü Zhipeng, Cui Jian, et al. Operation area calculation and parameter analysis of virtual synchronous machine [J]. Power Grid Technology, 2019, 43(5): 1557-1565.
- [9] Hu W, Wu Z, Dinavahi V. Dynamic analysis and model order reduction of virtual synchronous machine based micro-grid[J]. IEEE Access, 2020, 8: 106585-106600.
- [10] Thenpennaisivem S, Senthilkumar V. Improvement of transient and small signal stability in micro grid by hybrid technique with

- virtual synchronous generator control scheme [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2021, 43 (12): 2835-2859.
- [11] Pournazarian B, Sangrody R, Lehtonen M, et al. Simultaneous optimization of virtual synchronous generators parameters and virtual impedances in islanded microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(6): 4202-4217.
- [12] Alipoor J, Miura Y, Ise T. Stability assessment and optimization methods for microgrid with multiple VSG units [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1462-1471.
- [13] 王淋, 巨云涛, 吴文传, 等. 面向频率稳定提升的虚拟同步化微电网惯量阻尼参数优化设计 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4479-4489.
- Wang Lin, Ju Yuntao, Wu Wenchuan, et al. Optimal design of inertia damping parameters of virtual synchronous microgrid for frequency stabilization [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4479-4489.
- [14] Poolla B K, Groß D, Dörfler F. Placement and implementation of grid-forming and grid-following virtual inertia and fast frequency response [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3035-3046.
- [15] 黄俊凯, 杨知方, 刘珏麟, 等. 面向小干扰稳定提升的虚拟惯量优化分配模型与方法 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(3): 713-722.
- Huang Junkai, Yang Zhifang, Liu Juelin, et al. Virtual inertia optimization allocation model and method for small disturbance stable lifting [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3): 713-722.
- [16] Chu T F, Jun Z, Zhao P W, et al. Active-support integrated control method for renewable energy generation voltage source converters [J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 10: 37-49.