



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404623

引用格式:冯云龙,希望·阿不都瓦依提.基于虚拟同步发电机参数优化的模糊自适应控制策略[J].科学技术与工程,2025,25(14):5877-5885.

Feng Yunlong, Xiwang Abuduwayiti. Fuzzy adaptive control strategy based on parameter optimization of virtual synchronous generator[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(14): 5877-5885.

电工技术

## 基于虚拟同步发电机参数优化的模糊自适应控制策略

冯云龙, 希望·阿不都瓦依提\*

(新疆大学电气工程学院, 乌鲁木齐 830049)

**摘要** 针对基于虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制的并网逆变器存在的抗扰能力差和动态响应时间长的问題,提出了一种VSG的改进模糊自适应控制策略。首先,建立VSG小信号模型,分析虚拟惯量与阻尼系数对系统动态响应的影响。确定两参数取值范围并利用麻雀搜索算法对自适应策略中惯量和阻尼的初始值寻优。其次,分析系统受扰动后的角频率变化曲线,细化设计模糊规则。最后,在MATLAB/Simulink中搭建单机VSG模型,将不同控制策略进行对比。结果表明:在指令功率和负载功率突变时,本文所提模糊自适应策略不仅提高了系统响应速度,且抗扰能力强。证明了研究成果的有效性。

**关键词** 虚拟同步发电机; 麻雀搜索算法; 虚拟惯量; 阻尼系数; 模糊自适应控制

中图法分类号 TM464; 文献标志码 A

### Fuzzy Adaptive Control Strategy Based on Parameter Optimization of Virtual Synchronous Generator

FENG Yun-long, XIWANG Abuduwayiti\*

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830049, China)

**[Abstract]** Aiming at the problems of poor disturbance immunity and long dynamic response time of the grid-connected inverter based on VSG (virtual synchronous generator) control, an improved fuzzy adaptive control strategy for VSG was proposed. First, a small-signal model of VSG was established to analyze the effects of virtual inertia and damping coefficient on the dynamic response of the system. Determine the value range of the two parameters and use the sparrow search algorithm to optimize the initial values of inertia and damping in the adaptive strategy. Next, the angular frequency change curve of the system after perturbation was analyzed to refine the design fuzzy rules. Finally, a stand-alone VSG model was built in MATLAB/Simulink to compare the different control strategies. The results show that the fuzzy adaptive strategy proposed in this paper not only improves the response speed of the system, but also has a strong anti-disturbance ability when the command power and load power change suddenly. The effectiveness of this paper's strategy is proved.

**[Keywords]** virtual synchronous generator; sparrow search algorithm; virtual inertia; damping factor; fuzzy adaptive control

“双碳”背景下,大量新能源通过电力电子变换器接入电网<sup>[1]</sup>。电力电子器件使电力系统整体的惯性和阻尼降低,影响系统的稳定性<sup>[2]</sup>。此背景下,虚拟同步发电机技术被提出,其通过控制过程使逆变器有同步发电机(synchronous generator, SG)的惯性和阻尼特性<sup>[3]</sup>。但在新能源出力波动时,逆

变器输出频率与功率的响应曲线也会有超调和振荡现象。惯量与阻尼系数的不合理设置也会使振荡加剧<sup>[4]</sup>。

文献[5]提出了运用棒棒算法对虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)的虚拟惯量自适应调节,但该方法使参数呈离散变化,同时惯量

收稿日期:2024-06-29; 修订日期:2025-02-25

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金(2022D01C664)

第一作者:冯云龙(1998—),男,汉族,河南郑州人,硕士研究生。研究方向:新能源发电与并网技术。E-mail:1731477791@qq.com。

\*通信作者:希望·阿不都瓦依提(1967—),男,维吾尔族,新疆乌鲁木齐人,博士,副教授。研究方向:电力电子技术及多种可再生能源互补发电。E-mail:xiwang\_x@126.com。

的突变会使系统稳定性变差。且未考虑阻尼系数对 VSG 系统的影响。文献[6]在 VSG 控制环节中引入阻尼协同惯量控制,有效抑制功率振荡维持频率稳定,但其将参数设为定值,导致参数无法适时调整。文献[7]借助角频率偏差和变化率曲线,分析阻尼和惯量的变化趋势,构造分段函数实现线性自适应控制,实现了调整值对角频率偏差的追踪,但线性控制有惯量与阻尼系数突变现象。文献[8]采用根轨迹法对比 3 种函数形式中控制参数的变化灵敏度,探讨参数变化对动态过程的影响,然而未给出参数选取范围。文献[9]给出惯量阻尼参数选取范围,并利用改进粒子群算法确定线性自适应控制中惯量阻尼的稳态值。文献[10-11]用神经网络算法处理连续非线性函数的优势,有效提升系统调节能力。但实际上运行计算量大且目标函数设计困难。

由于模糊控制无须考虑复杂的函数形式且计算量小。文献[12]结合惯量阻尼调整原则设计双参数的模糊规则,兼顾动态调节的快速性与稳定性。文献[13]考虑了储能约束下的惯量取值范围,但加大了分析难度。文献[14]将系统受扰动时的角频率变化过程细分,精细设计模糊规则,提升控制灵敏度。

当前各种控制策略均能改善 VSG 系统的动态性能,但仍有不足:分段线性控制中的关键参数设置繁琐,且阻尼系数突变使得 VSG 控制效果变差。模糊控制可使阻尼系数变化更缓和,但模糊自适应控制的精度不仅与模糊规则有关,还与自适应策略的初值相关。现选用麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)优化 VSG 系统惯量和阻尼系数的稳态值。通过分析扰动时角频率变化过程,细化模糊控制规则,进一步提升 VSG 模糊自适应控制的精度。最终,该策略可减小 VSG 输出功率超调量和频率偏差量,加快调节时间。通过对比几种不同 VSG 控制策略,验证本文控制策略的有效性。

## 1 VSG 参数的优化

### 1.1 VSG 控制结构与原理

常规 VSG 控制拓扑如图 1 所示。新能源发电装置与储能系统并联后,通过三相逆变器的直流交流变换、LC 滤波器的滤波,可将输出功率传至负荷或将增发功率送至交流电网。

由图 1 可知,逆变器输出功率实时计算并送入 VSG 控制环节,VSG 控制可实时生成虚拟相角与输出电压幅值,相角与电压幅值可合成三相电势,再结合  $d, q$  轴变换与电压电流控制器,生成逆变器输出电势参考值,电势参考值经过正弦脉宽调制(sinusoidal pulse width modulation, SPWM)控制三相逆

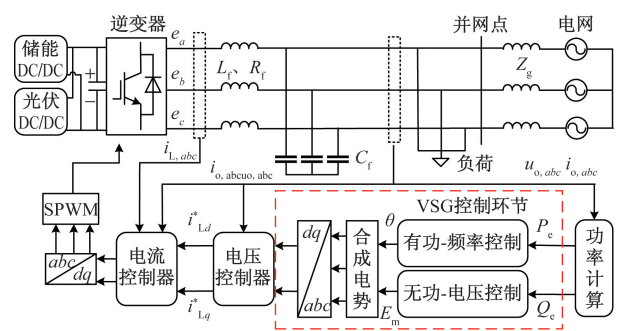


图 1 VSG 的控制拓扑图

Fig. 1 Control topology diagram of VSG

变器的开关管,使逆变器输出参考电势值。

VSG 控制的核心部分是有功频率控制和无功电压控制。这两部分分别可实现 VSG 系统的调频调压功能。其中,有功频率控制中的惯量和阻尼系数是影响 VSG 系统输出功率和频率暂态性能的关键参数。采用 SG 的经典二阶模型对 VSG 建模。

VSG 的有功频率控制中包括虚拟调速器和转子运动特性环节,其转子运动方程表示为

$$\begin{cases} J \frac{d(\omega - \omega_0)}{dt} = \frac{P_m - P_e}{\omega_0} - D(\omega - \omega_0) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: $J$ 为虚拟惯量,  $\text{kg/m}^2$ ;  $\omega, \omega_0$ 分别为输出角频率和额定角频率,  $\text{rad/s}$ ;  $P_m, P_e$ 为机械功率和电磁功率,  $\text{W}$ ;  $D$ 为阻尼系数,  $(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s})/\text{rad}$ ;  $\theta$ 为输出虚拟相角,  $\text{rad}$ 。

虚拟调速器有一次调频功能,表达式为

$$P_m = P_{\text{ref}} + \Delta P = P_{\text{ref}} - K_w(\omega_0 - \omega) \quad (2)$$

式(2)中: $P_{\text{ref}}$ 为有功功率指令值; $K_w$ 为调差系数。

VSG 的无功电压控制的表达式为

$$E_m = E_0 + K_q(Q_{\text{ref}} - Q_e) + K_u(U_{\text{ref}} - U_o) \quad (3)$$

式(3)中: $E_0, E_m$ 分别为空载电压、输出相电压幅值,  $\text{V}$ ;  $K_q, K_u$ 分别为无功下垂系数、电压调节系数; $Q_{\text{ref}}, Q_e$ 分别为输出无功功率参考值、实际值,  $\text{kVar}$ ; $U_{\text{ref}}, U_o$ 分别为输出电压参考值、实际值,  $\text{V}$ 。

无功环节的虚拟电势  $E_m$  与有功环的虚拟相位角  $\theta$  结合,可以得到输出虚拟电势向量  $\mathbf{E}_{abc}$ 。

$$\mathbf{E}_{abc} = \begin{bmatrix} E_m \sin \theta \\ E_m \sin(\theta - 2\pi/3) \\ E_m \sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (4)$$

VSG 控制图如图 2 所示。

虚拟电势向量  $E_{abc}$  经过  $d, q$  轴变换生成轴分量  $E_d, E_q$ ; 将其送入电压控制器与电流控制器<sup>[15]</sup>。最终生成逆变器输出电势参考值的  $d, q$  轴分量, 分别为  $e_d^*, e_q^*$ ; 电压外环控制与电流内环控制环节的相对应的公式分别为

$$\begin{cases} i_{Ld}^* = \left(K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s}\right)(E_d - u_{od}) - \omega_0 C_f u_{oq} + i_{od} \\ i_{Lq}^* = \left(K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s}\right)(E_q - u_{oq}) - \omega_0 C_f u_{od} + i_{oq} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} e_d^* = \left(K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s}\right)(i_{Ld}^* - i_{Ld}) - \omega_0 L_f i_{Lq} + u_{od} \\ e_q^* = \left(K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s}\right)(i_{Lq}^* - i_{Lq}) + \omega_0 L_f i_{Ld} + u_{oq} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $i_{Ld}^*, i_{Lq}^*$  为逆变器输出电流参考值的  $d, q$  轴分量;  $K_{pv}, K_{iv}, K_{pi}, K_{ii}$  分别为电压与电流控制中 PI 控制参数;  $u_{od}, u_{oq}$  为机端输出电压的  $d, q$  轴分量;  $i_{od}, i_{oq}$  为机端输出电流的  $d, q$  轴分量;  $i_{Ld}, i_{Lq}$  为逆变器输出电流的  $d, q$  轴分量。

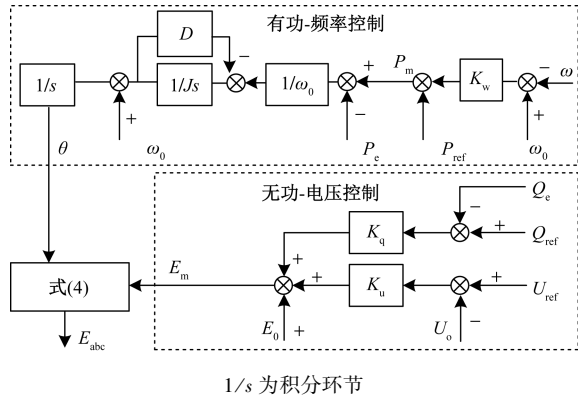


图 2 VSG 的有功和无功控制原理图

Fig. 2 Active and reactive power control schematic for VSG

### 1.2 VSG 动态特性分析

将运行中的 VSG 系统理想化, 得并网等效电路, 如图 3 所示。设  $\delta$  为 VSG 的功角,  $E$  为输出相电压有效值;  $U$  为网侧相电压有效值;  $\delta = \theta - \omega_0 t$ 。

忽略 VSG 输出电压与参考电压的静态误差, 类比 SG 的电磁原理, 得 VSG 输出功率为

$$P_e = \frac{3EU}{X_f} \sin\delta \approx \frac{3EU}{X_f} \delta = K_p \delta \quad (7)$$

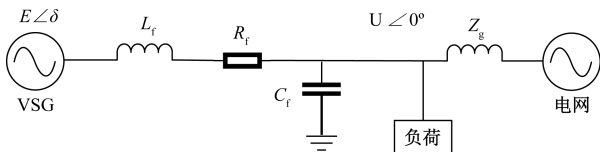


图 3 VSG 并网等效电路

Fig. 3 VSG grid-connected equivalent circuit

式(7)中: 定义  $K_p = 3EU/X_f$ ; 纯感性线路并网时, 即  $\omega_0 L_f \gg R_f; \delta \approx 0^\circ; E \approx U$ 。

由式(1)和式(7)推出有功控制环节小信号模型, 如图 4 所示。

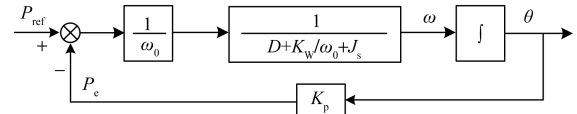


图 4 VSG 的有功功率控制小信号模型

Fig. 4 Small-signal model for active power control of VSGs

同时可得指令功率  $P_{ref}$  分别与输出功率  $P_e$ 、输出角频率  $\omega$  之间的传递函数为

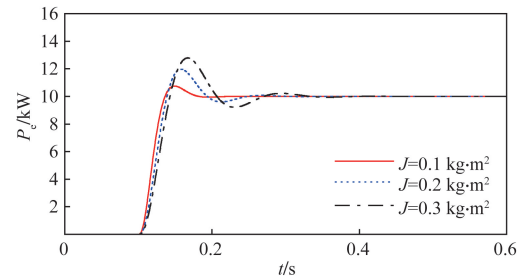
$$G_p(s) = \frac{P_e(s)}{P_{ref}(s)} = \frac{K_p}{J\omega_0 s^2 + (D\omega_0 + K_w)s + K_p} \quad (8)$$

$$G_\omega(s) = \frac{\omega(s)}{P_{ref}(s)} = \frac{s}{J\omega_0 s^2 + (D\omega_0 + K_w)s + K_p} \quad (9)$$

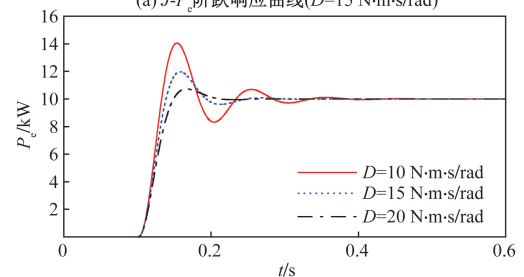
式(8)对应的二阶系统的自然振荡角频率  $\omega_n$  和阻尼比  $\xi$  如式(10)所示。由文献[16]知,  $K_w$  一般取定值,  $K_w = 25$ 。则系统动态特性受  $J, D$  取值影响。

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{K_p}{J\omega_0}} \\ \xi = \left(\frac{D}{2} + \frac{K_w}{2\omega_0}\right) \sqrt{\frac{\omega_0}{JK_p}} \end{cases} \quad (10)$$

令  $P_{ref} = 10 \text{ kW}$ , 由式(8)得出  $J$  和  $D$  变化时的功率阶跃响应曲线, 如图 5 所示。



(a)  $J$ - $P_e$  阶跃响应曲线 ( $D=15 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$ )



(b)  $D$ - $P_e$  阶跃响应曲线 ( $J=0.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ )

图 5 有功功率输出响应曲线

Fig. 5 Active power output response curves

由式(9)得出  $J$  和  $D$  变化时的输出频率差值  $\Delta f$  响应曲线,如图6所示。

分析可知,参数变化与系统响应曲线的调节时间  $t_s$  和超调量  $\sigma$  的关系,如表1所示。从表1可看出:当  $D$  固定,  $J$  变大时,输出功率曲线的超调可被减小,但输出频率曲线的偏差就会变大。

同时,为分析  $J$ 、 $D$  变化对系统稳定性的影响,将式(8)对应的二阶闭环系统进行根轨迹分析。

由图7知,随着  $J$  增加,极点集体靠近虚轴,系统稳定性变差;当  $J$  固定,  $D$  在  $[0, 50]$  内增加时,极

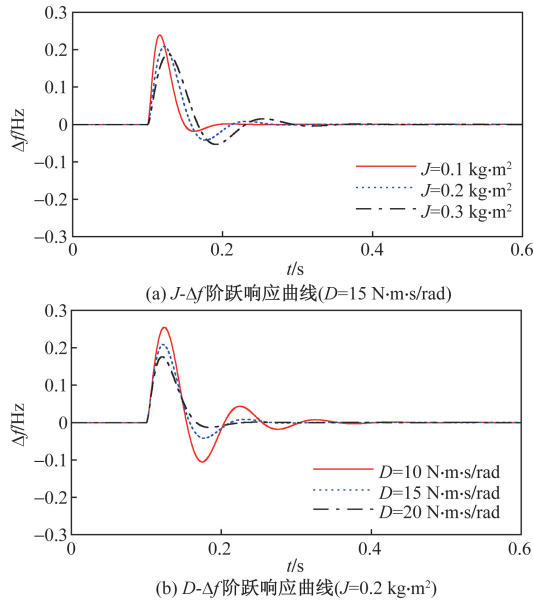


图6 频率输出响应曲线

Fig. 6 Frequency output response curves

表1 参数对性能指标的影响

Table 1 Influence of parameters on performance indicators

| 参数       | 由图5 功率输出响应曲线 |              | 由图6 频率输出响应曲线 |              |
|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|          | $J \uparrow$ | $D \uparrow$ | $J \uparrow$ | $D \uparrow$ |
| $\sigma$ | $\uparrow$   | $\downarrow$ | $\downarrow$ | $\downarrow$ |
| $t_s$    | $\uparrow$   | $\downarrow$ | $\uparrow$   | $\downarrow$ |

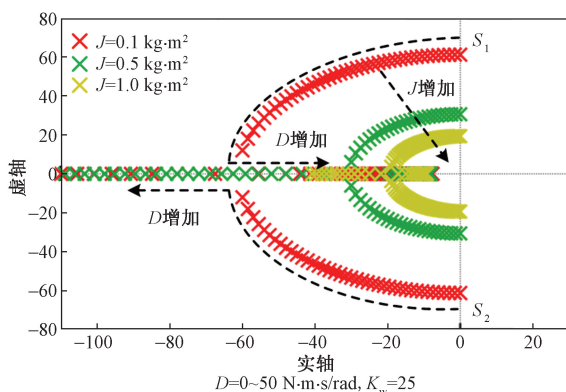


图7 根轨迹图

Fig. 7 Root trajectory diagram

点沿虚线向实轴左半轴移动,系统为欠阻尼状态。 $D$  增大到一定值,系统的一对共轭复根会合于实轴,此时系统处于临界状态。阻尼  $D$  继续增大时,极点在实轴上反向运动,系统处于过阻尼状态。

$J$  和  $D$  过小,系统动态性能变差,  $J$  过大,系统稳定性变差。 $D$  过大,使系统为过阻尼状态时,系统响应过程将变慢。故参数的取值要合理设置。

### 1.3 $J$ 与 $D$ 的取值范围

据分布式电源并网技术标准<sup>[16]</sup>,逆变器仅能正常运行于  $\Delta f \pm 5\%$  内,故逆变器调频所需有功功率应是额定容量的  $40\% \sim 100\%$ , 故有

$$\frac{0.4\Delta P_{\max}}{\omega_0\Delta\omega_{\max}} \leq D + \frac{K_w}{\omega_0} \leq \frac{\Delta P_{\max}}{\omega_0\Delta\omega_{\max}} \quad (11)$$

式(11)中:  $\Delta\omega_{\max} = \pi$ ;  $\Delta P_{\max}$  为最大输出功率差值;  $\Delta\omega_{\max}$  最大角频率差值。

取额定容量  $30 \text{ kV} \cdot \text{A}$ , 则  $D$  的范围  $[12.08, 30.33]$ 。考虑超调量和调节时间<sup>[4]</sup>, 设置阻尼比区间为  $[0.707, 1]$ , 则  $J$  的取值公式为

$$\frac{(D + K_w/\omega_0)^2\omega_0}{2^2K_p} \leq J \leq \frac{(D + K_w/\omega_0)^2\omega_0}{1.4^2K_p} \quad (12)$$

可得  $J$  的范围是  $[0.08, 1.02]$ 。传统 VSG 的  $J$ 、 $D$  的稳态值是在参数范围内按经验取值, 本文则折中设置取值区间, 由算法寻优取值。

### 1.4 基于麻雀搜索算法的 $J$ 和 $D$ 寻优

适应度函数可对种群个体的适应性进行衡量。误差绝对值时间积分 (integrated time absolute error, ITAE) 可用于全面描述系统动态性能。ITAE 的表达式为

$$F_{\text{ITAE}} = \int_0^t |\Delta f| dt \quad (13)$$

式(13)中:  $\Delta f$  为  $P_{\text{ref}}$  突变后的频率差值。

麻雀搜索算法是仿麻雀觅食和反捕食行为的一种优化算法。待优化参数个数即维度  $d, n$  只麻雀组成种群, 并分为探索者、加入者、警戒者<sup>[15]</sup>。

探索者向其他个体提供觅食方向和区域。更优适应度的个体先发现食物。迭代中, 位置更新为

$$\mathbf{X}_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} \mathbf{X}_{i,j}^t \exp\left(-\frac{i}{\alpha T}\right), & R_2 < S \\ \mathbf{X}_{i,j}^t + QL, & R_2 \geq S \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中:  $t$  为目前迭代值;  $T$  为最大迭代值;  $\mathbf{X}_{i,j}^t$ 、 $\mathbf{X}_{i,j}^{t+1}$  分别为第  $t$  次与  $t+1$  次迭代时第  $i$  只鸟第  $j$  维的位置;  $\alpha$  为  $(0, 1]$  内随机值;  $Q$  为服从正态分布的随机值;  $L$  为元素都是 1 的  $1 \times d$  阶矩阵;  $R_2$  和  $S$  为预警值和安全值; 当  $R_2 \geq S$ , 当前位置个体向种群发出警报并逃离该地。

加入者跟随发现者并抢食,其位置更新式为

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} Q \exp\left(\frac{X_w^t - X_{i,j}^t}{l^2}\right), & i > \frac{n}{2} \\ X_p^{t+1} + |X_{i,j}^t - X_p^{t+1}| \mathbf{A}^+ \mathbf{L}, & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中:  $X_p^{t+1}$  为发现者最优位置;  $X_w^t$  为第  $t$  次迭代的最差位置;  $\mathbf{A}$  为  $1 \times d$  的矩阵,矩阵元素随机赋值为  $-1$  或  $1$ ,且  $\mathbf{A}^+ = \mathbf{A}^T (\mathbf{A}\mathbf{A}^T)^{-1}$ ;  $i > n/2$  时,适应度差的第  $i$  加入者未获得食物,飞向它地觅食。

当发现危险时,警戒者会及时向其他个体发出警报,让种群远离当前捕食区域,公式为

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{best}^t + \beta |X_{i,j}^t - X_{best}^t|, & f_i > f_g \\ X_{i,j}^t + K \left[ \frac{|X_{i,j}^t - X_w^t|}{(f_i - f_w) + \varepsilon} \right], & f_i = f_g \end{cases} \quad (16)$$

式(16)中:  $X_{best}^t$  为全局最优位置;  $\beta$  为步长参数;  $K$  为  $[-1, 1]$  范围的随机值,表示麻雀移动方向;  $f_i$  为当前适应度值;  $f_g$  和  $f_w$  为当前全局最佳和最差的适应度值;  $\varepsilon$  为趋于零的数,防止分母变零。

$f_i > f_g$  时,麻雀在种群边缘,易受天敌攻击;  $f_i = f_g$  时,种群中间的麻雀发现危险,飞向其他麻雀减少风险。

寻优过程如下:①设定范围,初始化  $n$ 、 $d$  以及捕食者、加入者的行列;②计算适应度值并排序;③更新捕食者、加入者、警戒者的位置;④计算适应度值并更新麻雀位置;⑤满足停止条件,则退出;否则转至步骤②。

## 2 VSG 模糊自适应控制

### 2.1 VSG 自适应原理

由式(1)可得式(17),即

$$\begin{cases} \Delta\omega = \frac{P_m - P_e - J\omega_0(d\omega/dt)}{D} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m - P_e - D\Delta\omega}{J\omega_0} \end{cases} \quad (17)$$

$\Delta\omega$  分别与  $D$  反比,  $d\omega/dt$  与  $J$  为反比;调整  $J$  与  $D$  可抑制扰动时  $\Delta\omega$  与  $d\omega/dt$  的变化。固定惯量和阻尼时,频率振荡曲线如图 8 所示。本文研究将此过程分 8 个区间分析。

区间  $[1, 2]$  内,角频率的偏差  $\Delta\omega$  和偏导  $d\omega/dt$  都大于 0,但区间 1 内  $d\omega/dt$  变化更快,应增大  $J$  微增  $D$  来抑制频率突变;在区间 2 内  $\Delta\omega$  更大,应微增  $J$ 、增大  $D$  来抑制偏差继续变大。

区间  $[3, 4]$  内,  $\Delta\omega > 0$ ,  $d\omega/dt < 0$ ,但区间 3 内  $d\omega/dt$  相对更大,增大  $D$  减小  $J$  加快频率恢复;区间 4 内让  $J$  微减,微增  $D$ , 加快频率恢复和减小功率超调,同时减弱区间 5 内初始的  $d\omega/dt$ 。区间  $[5, 8]$  的

取值类似区间  $[1, 4]$ 。由此得出  $J$  和  $D$  取值规则,如表 2 所示。

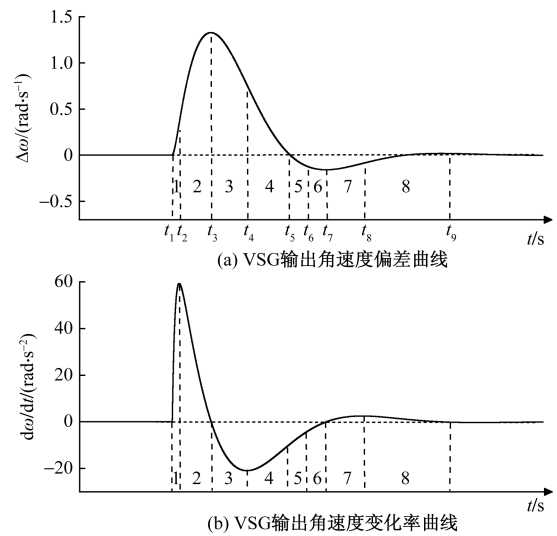


图 8 角频率的变化曲线图

Fig. 8 Variation curves of angular frequency

表 2  $J$  和  $D$  的调整原则

Table 2 Adjustment principles for  $J$  and  $D$

| 区段 | $\Delta\omega$ | $d\omega/dt$ | $J$ | $D$ |
|----|----------------|--------------|-----|-----|
| 1  | $> 0$          | $\geq 0$     | 增大  | 微增  |
| 2  | $\geq 0$       | $> 0$        | 微增  | 增大  |
| 3  | $\geq 0$       | $< 0$        | 减小  | 增大  |
| 4  | $> 0$          | $\leq 0$     | 微减  | 微增  |
| 5  | $< 0$          | $\leq 0$     | 增大  | 微增  |
| 6  | $\leq 0$       | $< 0$        | 微增  | 增大  |
| 7  | $\leq 0$       | $> 0$        | 减小  | 增大  |
| 8  | $< 0$          | $\geq 0$     | 微减  | 微增  |

### 2.2 模糊自适应设计

VSG 参数模糊自适应控制结构如图 9 所示。模糊控制器主要由模糊化、模糊推理和解模糊 3 部分组成。以  $\Delta\omega$  和  $d\omega/dt$  的信号作为输入,经隶属度函数模糊化,然后通过模糊规则和解模糊得到惯量和阻尼变化值  $J_A$  和  $D_A$ 。

经 1.5 节整定后得  $J_0$ 、 $D_0$  的取值;变化值与初值结合后,得到功率频率控制环节的惯量和阻尼的自适应取值为:  $J = J_0 + J_A$ ,  $D = D_0 + D_A$ 。

将输入输出的论域统一为  $[-6, 6]$ 。  $K_e$ 、 $K_{ec}$  为输入量化因子,可将输入的实际变化范围量化至  $[-6, 6]$  内。最大功率波动时,  $\Delta\omega$  与  $d\omega/dt$  取得最大的实际变化范围。

输出输入的模糊子集均为 {负大(FB)、负中(FM)、负小(FS)、零(O)、正小(ZS)、正中(ZM)、正大(ZB)};经过修正后,隶属度函数采用中间 trimf 型,两端 gaussmf 型,如图 10 所示。参考表 2 修改  $J_A$ 、 $D_A$  的模糊规则,具体规则如表 3 和表 4 所示。

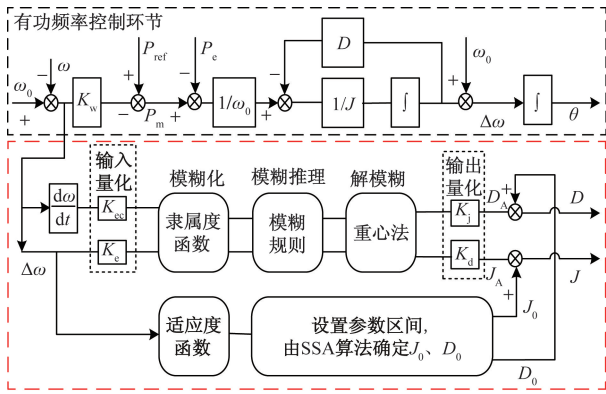


图9 改进模糊自适应结构

Fig. 9 Improved fuzzy adaptive structure

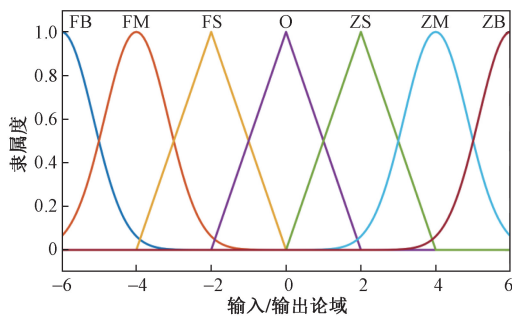


图10 隶属度函数分布

Fig. 10 Distribution of affiliation function

表3 JA 的规则表

Table 3 Fuzzy rules of JA

| dω/dt | Δω |    |    |    |    |    |    |
|-------|----|----|----|----|----|----|----|
|       | FB | FM | FS | O  | ZS | ZM | ZB |
| FB    | ZB | ZB | ZB | ZS | FB | FB | FB |
| FM    | ZB | ZB | ZM | O  | FM | FM | FB |
| FS    | ZB | ZM | ZM | O  | FM | FM | FM |
| O     | ZS | ZS | O  | O  | O  | ZS | ZS |
| ZS    | FM | FM | FM | O  | ZM | ZM | ZB |
| ZM    | FB | FM | FM | O  | ZM | ZB | ZB |
| ZB    | FB | FB | FB | ZS | ZB | ZB | ZB |

表4 DA 的规则表

Table 4 Fuzzy rules of DA

| dω/dt | Δω |    |    |    |    |    |    |
|-------|----|----|----|----|----|----|----|
|       | FB | FM | FS | O  | ZS | ZM | ZB |
| FB    | ZB | ZM | ZM | ZS | ZM | ZM | ZB |
| FM    | ZB | ZM | ZM | O  | ZM | ZM | ZB |
| FS    | ZB | ZM | ZM | O  | ZM | ZM | ZB |
| O     | ZB | ZM | ZM | O  | ZM | ZM | ZB |
| ZS    | ZB | ZM | ZM | O  | ZM | ZM | ZB |
| ZM    | ZB | ZM | ZM | O  | ZM | ZM | ZB |
| ZB    | ZB | ZM | ZM | ZS | ZM | ZM | ZB |

模糊推理用 mamani 型算法;解模糊则采用重心法。推理输出的结果经过比例因子  $K_J$  与  $K_D$  相乘,得到最终的调整值  $J_A$  及  $D_A$ 。为防止  $J_0 + J_A \leq 0.08$ ,取  $K_J = (J_0 - 0.08)/6, K_D = (30.33 - D_0)/6$ 。

### 3 仿真实验分析

在 MATLAB/Simulink 中搭建 VSG 系统并入无穷大电网模型。先用 SSA 算法对惯量阻尼的稳态值寻优,并整定模糊策略参数,最后在不同情景下验证本文控制策略的有效性。系统参数如表 5 所示。

表5 VSG 系统的仿真参数

Table 5 Simulation parameters of the VSG system

| 参数                                  | 数值  |
|-------------------------------------|-----|
| 网侧电压 $U_g/V$                        | 380 |
| 额定角频率 $\omega_0/(rad \cdot s^{-1})$ | 314 |
| 直流电压 $U_{dc}/V$                     | 800 |
| 滤波电感 $L_f/mH$                       | 3.2 |
| 寄生电阻 $R_f/\Omega$                   | 0.1 |
| 滤波电容 $C_f/\mu F$                    | 20  |

#### 3.1 SSA 算法仿真

设定算法种群规模为 30,迭代 100 次。据 1.4 节和 1.5 节设置合理范围与适应度函数。适应度曲线对比如图 11 所示,第 18 次迭代时,SSA 算法就可得最优适应度值。对比可知;SSA 算法寻优速度更快。

确定  $J, D$  自适应策略的初值后,对模糊控制参数进行整定,结果如表 6 所示。

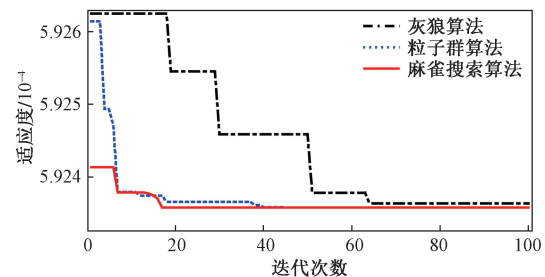


图11 适应度函数曲线对比图

Fig. 11 Comparison of fitness function curves

表6 整定后的参数

Table 6 Parameter after adjustment

| 参数                   | 数值    | 参数                                       | 数值    |
|----------------------|-------|--|-------|
| $J_0/(kg \cdot m^2)$ | 0.4   | $D_0/(N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1})$ | 25.72 |
| 量化因子 $K_e$           | 3     | 量化因子 $K_{ec}$                            | 0.05  |
| 比例因子 $K_J$           | 0.053 | 比例因子 $K_d$                               | 0.76  |

#### 3.2 不同控制方法对比

分别在指令有功功率和负载功率突变情景下,对以下 4 种控制方式进行仿真,并对比效果。

(1) 定参数(经验值):  $J = 0.47, D = 22$ 。

(2) 定参数(优化值):  $J = 0.4, D = 25.72$ 。

(3) 线性策略<sup>[17]</sup>(优化后):  $J_0 = 0.4, D_0 = 25.72$ ;调节系数  $k_j = 0.001, k_D = 4$ 。

(4) 本文模糊策略(优化后), 参数同表 6。

情景 1(指令功率突变): VSG 系统初始有功负荷 15 kW; 0.4、1.2 s 时, 指令功率分别上升 10 kW, 下降 5 kW。输出响应曲线对比如图 11 所示。

用 3 种指标对响应结果评价。如表 7 所示, 与参考功率的最大功率偏差为  $\Delta P_{\max}$ ; 与额定频率的最大频率偏差为  $\Delta f_{\max}$ ; 扰动后到达稳态的时间为  $t_m$ 。

对 0.45 s 附近的扰动后的响应曲线分析。相比于经验取值的定参数方式(1), 经  $J$ 、 $D$  寻优后的方式(2)可以使功率超调降低 70%, 使频率偏差降低 13%, 表明参数寻优的必要性。与参数优化后的定参数方式(2)和线性方式(3)相比, 本文模糊方式(4)可将功率超调分别减少 83% 和 66%, 将频率偏差分别减少 8% 和 3%; 调节时间方面, 与定参数方式(2)相比, 方式(3)与方式(4)可使调节时间减小 33% 和 27%; 线性方式(3)能使输出响应曲线更快到稳态值附近, 主要原因可分析惯量阻尼系数变化过程得出。

线性自适应与模糊自适应的  $J$ 、 $D$  变化曲线如图 13 示。在 0.45 s 或 1.25 s 左右, 线性自适应中阻尼系数的突降会使响应恢复更快, 但振荡抑制能力会变弱, 故图 12 中线性方式(3)的响应曲线较快到稳态值, 在稳态值附近有较小范围的振荡。模糊控制的惯量变化灵活, 阻尼变化更缓和, 输出响应曲线更平滑。同时, 精细模糊规则可使参数调节灵敏。

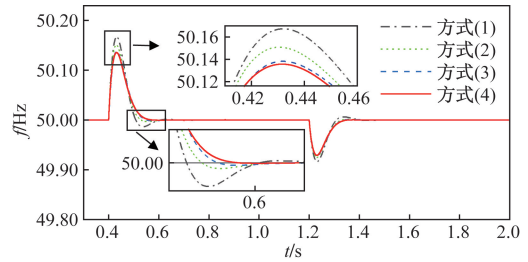
情景 2(负载功率波动): 初始阶段有 20 kW 的有功负荷, 0.6 s 失去 8 kW 负荷, 1.4 s 投入 7 kW 负荷。输出功率和频率响应曲线如图 14 所示。

由图 14 可知, 0.62 s 时, 4 种控制方式下的功率差值基本一致。0.72 s 左右, 功率响应曲线处于恢复阶段, 不同控制下最大功率差值与振荡现象不同。与定参数方式(2)与线性自适应方式(3)相比, 本文模糊控制方式(4)可使功率超调分别减小 74% 和 70%。

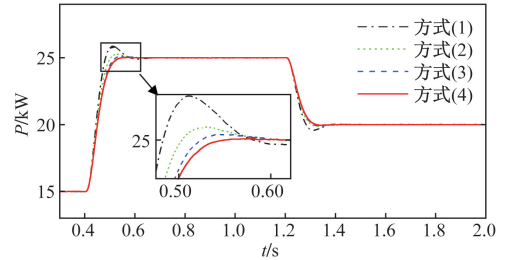
表 7 指令功率变化时不同控制的指标对比

Table 7 Comparison of metrics for different controls when commanded power changes

| 时间段       | 控制方式  | $\Delta P_{\max}/W$ | $\Delta f_{\max}/Hz$ | $t_m/s$ |
|-----------|-------|---------------------|----------------------|---------|
| 0.45 s 附近 | 方式(1) | 870                 | 0.167                | 0.38    |
|           | 方式(2) | 260                 | 0.146                | 0.36    |
|           | 方式(3) | 120                 | 0.138                | 0.24    |
|           | 方式(4) | 40                  | 0.134                | 0.26    |
| 1.25 s 附近 | 方式(1) | 426                 | 0.081                | 0.32    |
|           | 方式(2) | 327                 | 0.075                | 0.30    |
|           | 方式(3) | 91                  | 0.072                | 0.22    |
|           | 方式(4) | 42                  | 0.070                | 0.23    |



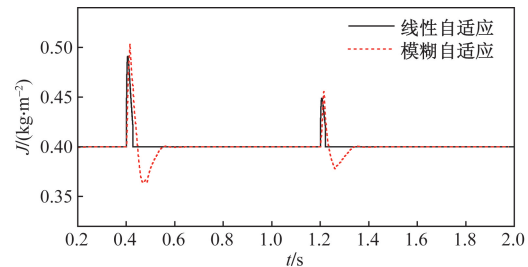
(a) 频率响应曲线



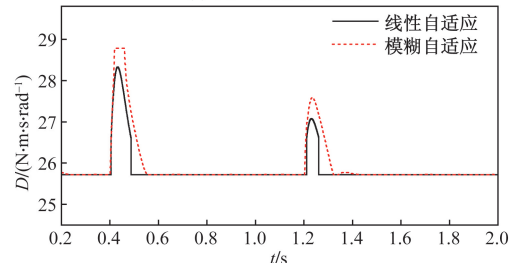
(b) 功率输出响应曲线

图 12 指令功率变化时不同控制的输出曲线对比

Fig. 12 Comparison of output curves of different controls for command power change



(a) 惯量系数变化曲线



(b) 阻尼系数变化曲线

图 13 不同控制的  $J$  和  $D$  的变化曲线对比

Fig. 13 Comparison of variation curves of  $J$  and  $D$

表 8 负荷功率突变时不同控制的指标对比

Table 8 Comparison of output curves of different controls during sudden change of load power

| 时间段       | 控制方式  | $\Delta P_{\max}/W$ | $\Delta f_{\max}/Hz$ | $t_m/s$ |
|-----------|-------|---------------------|----------------------|---------|
| 0.65 s 附近 | 方式(1) | 622                 | 0.110                | 0.30    |
|           | 方式(2) | 204                 | 0.098                | 0.28    |
|           | 方式(3) | 176                 | 0.094                | 0.23    |
|           | 方式(4) | 52                  | 0.091                | 0.25    |
| 1.25 s 附近 | 方式(1) | 542                 | 0.092                | 0.30    |
|           | 方式(2) | 190                 | 0.083                | 0.27    |
|           | 方式(3) | 184                 | 0.080                | 0.22    |
|           | 方式(4) | 76                  | 0.078                | 0.24    |

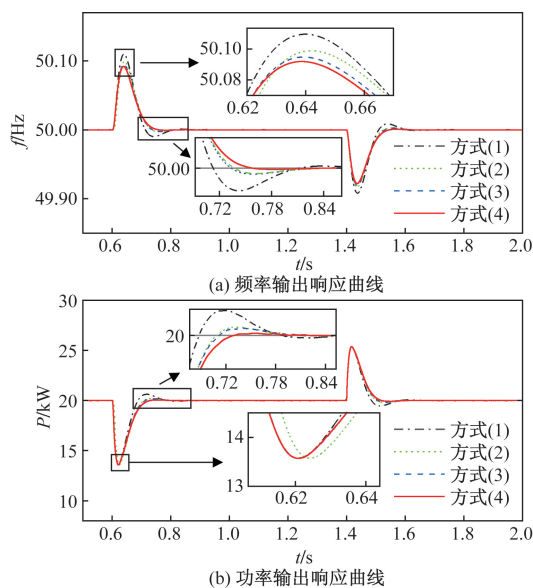


图 14 负荷功率突变时不同控制的输出曲线对比  
Fig. 14 Comparison of output curves of different controls during sudden change of load power

对 0.65 s 附近扰动的响应曲线分析。0.64 s 时频率差值达到最大,相比于定参数方式(2)与线性自适应方式(3),本文模糊控制方式(4)可使频率差值分别减小 7% 和 3%。

在采用本文的惯量阻尼模糊自适应控制策略后,VSG 系统的输出功率和输出频率超调都将减小,调节时间更短,响应曲线变化更平滑。此时 VSG 系统具有更好的暂态性能。

## 4 结论

分析了 VSG 控制中虚拟惯量  $J$  和阻尼系数  $D$  对系统动态响应的影响,并用麻雀搜索算法对两个参数的稳态值寻优,最终提出一种基于 VSG 参数优化的模糊自适应控制策略,得到以下结论。

(1) 针对传统 VSG 控制中对虚拟惯量和阻尼系数的稳态值取值粗略的问题,本文研究在合理参数范围内,由 SSA 算法对稳态值寻优取值。与传统取值相比,优化后的参数可使输出有功功率的超调和输出频率偏差均减小,同时可缩短调节时间。证明了参数寻优取值的优越性。

(2) 针对 VSG 系统在功率扰动时抗干扰性能差和动态响应时间长的问题,本文提出一种改进的惯量阻尼模糊自适应控制策略,不仅细化了模糊规则,还对自适应控制中的初始值寻优取值。与参数寻优后定惯量和定阻尼的 VSG 控制相比,本文所提策略使频率偏差平均减小了 7.5%。有功功率超调量平均减小了 78%,调节时间平均缩短了 18%。证明了本文模糊自适应控制增强了 VSG 系统的抗干

扰性能,减小了系统的动态响应时间。

(3) 与 VSG 系统中的常规线性自适应控制相比,采用模糊自适应控制策略后的转动惯量变化更加灵活,阻尼系数的突变现象有所改善,进而使得输出响应曲线更平滑,使系统的动态响应得到改善。

## 参 考 文 献

- [1] 张勇军, 羿应棋, 李立涅, 等. 双碳目标驱动的新型低压配电系统技术展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(22): 1-12.  
Zhang Yongjun, Yi Yingqi, Li Licheng, et al. Prospect of new low-voltage distribution system technology driven by carbon emission-peak and carbon neutrality targets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 1-12.
- [2] 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.
- [3] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2591-2603.  
Lü Zhipeng, Sheng Wanxing, Zhong Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [4] 朱晓龙, 刘毅力, 刘圣苻. 基于变论域模糊控制的 VSG 自适应控制策略[J]. 分布式能源, 2023, 8(5): 19-28.  
Zhu Xiaolong, Liu Yili, Liu Shengfu. VSG adaptive control strategy based on variable universe fuzzy control[J]. Distributed Energy, 2023, 8(5): 19-28.
- [5] Li J, Wen B Y, Wang H Y. Adaptive virtual inertia control strategy of VSG for micro-grid based on improved bang-bang control strategy [J]. IEEE Access, 2019, 7: 39509-39514.
- [6] Shintai T, Miura Y, Ise T. Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 668-676.
- [7] 陈来军, 王任, 郑天文, 等. 基于参数自适应调节的虚拟同步发电机暂态响应优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5724-5731, 6014.  
Chen Laijun, Wang Ren, Zheng Tianwen, et al. Optimal control of transient response of virtual synchronous generator based on adaptive parameter adjustment [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5724-5731, 6014.
- [8] 邹培根, 孟建辉, 王毅, 等. 灵活虚拟同步机主要控制参数对系统频率稳定性的影响分析[J]. 高电压技术, 2018, 44(4): 1335-1342.  
Zou Peigen, Meng Jianhui, Wang Yi, et al. Influence analysis of the main control parameters in FVSG on the frequency stability of the system [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1335-1342.
- [9] 郭建伟, 樊友平. 基于改进粒子群算法的 VSG 参数自适应控制策略[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(6): 72-82.  
Guo Jianwei, Fan Youping. Adaptive VSG parameter control strategy

- based on improved particle swarm optimization [J]. *Electric Machines and Control*, 2022, 26(6): 72-82.
- [10] 杨旭红, 姚凤军, 郝鹏飞, 等. 基于改进型 RBF 神经网络的 VSG 转动惯量自适应控制 [J]. *电测与仪表*, 2021, 58(2): 112-117.
- Yang Xuhong, Yao Fengjun, Hao Pengfei, et al. Adaptive inertia control for VSG based on improved RBF neural network [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2021, 58(2): 112-117.
- [11] 高子轩, 赵晋斌, 杨旭红, 等. 基于 RBF 的 VSG 转动惯量和阻尼系数自适应控制策略 [J]. *电力建设*, 2022, 43(9): 132-139.
- Gao Zixuan, Zhao Jinbin, Yang Xuhong, et al. RBF-based adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for VSG [J]. *Electric Power Construction*, 2022, 43(9): 132-139.
- [12] 程国栋, 邵宣, 王贵峰. 虚拟同步发电机参数自适应控制策略 [J]. *可再生能源*, 2021, 39(12): 1655-1661.
- Cheng Guodong, Shao Xuan, Wang Guifeng. Parameter adaptive control strategy of virtual synchronous generator [J]. *Renewable Energy Sources*, 2021, 39(12): 1655-1661.
- [13] 杨帆, 邵银龙, 李东东, 等. 一种计及储能容量和 SOC 约束的模糊自适应 VSG 控制策略 [J]. *电网技术*, 2021, 45(5): 1869-1877.
- Yang Fan, Shao Yinlong, Li Dongdong, et al. Fuzzy adaptive VSG control strategy considering energy storage capacity and SOC constraint [J]. *Power System Technology*, 2021, 45(5): 1869-1876.
- [14] 马宇鑫, 赵巧娥. 基于模糊控制的虚拟同步发电机参数自适应控制策略 [J]. *自动化与仪表*, 2022, 37(8): 24-29.
- Ma Yuxin, Zhao Qiaoe. Adaptive control strategy of virtual synchronous generator parameters based on fuzzy control [J]. *Automation & Instrumentation*, 2022, 37(8): 24-29.
- [15] 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 virtual synchronous generator grid-connected inverter based on linear active disturbance rejection and repetitive control [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(36): 15460-15468.
- [16] 何国庆, 王伟胜, 刘纯, 等. 分布式电源并网技术标准研究 [J]. *中国电力*, 2020, 53(4): 1-12, 176.
- He Guoqing, Wang Weisheng, Liu Chun, et al. Study on technical standard of distributed resources grid integration [J]. *Electric Power*, 2020, 53(4): 1-12, 176.
- [17] 杨赞, 梅飞, 张宸宇, 等. 虚拟同步发电机转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略 [J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(3): 125-131.
- Yang Yun, Mei Fei, Zhang Chenyu, et al. Coordinated adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for virtual synchronous generator [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(3): 125-131.