

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.05.013

基于改进模糊自适应的虚拟同步发电机扰动优化控制

王志祥¹, 潘国清², 袁宇波³, 谢文强³, 韩民晓¹

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 苏州清科电气有限公司, 江苏 苏州 215000;
3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:针对虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)并网合闸或系统扰动时,存在的动态响应表现不佳、鲁棒性不足问题,提出一种基于改进模糊自适应的VSG扰动优化控制策略。首先,建立传统VSG控制的小信号模型,分析转动惯量和阻尼系数对系统扰动响应的影响机理;其次,结合VSG扰动时的功角曲线以及频率特性曲线,构建转动惯量和阻尼系数的自适应调节规则;再次,设计模糊控制器的隶属度函数和控制规则库,构建模糊控制器的参数调节机制;然后,引入论域伸缩因子,实现模糊论域的动态调整;最后,通过MATLAB/Simulink仿真平台搭建单台VSG并网模型,仿真结果表明所提控制策略在负荷扰动、频率波动以及并网合闸阶段,均能有效抑制功率振荡,提高VSG并网合闸以及系统扰动情况下的适应性。

关键词:虚拟同步发电机(VSG);自适应参数;模糊控制;伸缩因子;论域调整;功率振荡

中图分类号:TM761

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2025)05-0138-10

0 引言

能源转型背景下,电力系统“双高”特征日益明显,传统电力系统依赖同步发电机的机械惯性和阻尼特性支撑电网的稳定,而以光伏、风电为主的可再生能源通过电力电子变换器接入电网,缺乏上述自然属性,导致系统稳定性下降^[1-6]。因此,有必要解决高比例新能源馈入电网的稳定性问题。

在此背景下,虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)技术顺势而生^[7-10]。传统VSG控制参数固定不变,无法对系统的扰动作出实时响应,因此缺乏良好的动态特性^[11-12]。为此,相关学者提出了不同方案,主要分为4种。(1)设计合理的自适应函数,对VSG控制参数进行自动调节。文献[13-16]分别提出比例系数函数、缓冲函数、指数函数自适应的控制策略,通过在不同阶段合理地转动惯量和阻尼系数进行调节,有效抑制了频率和功率波动,但是由于增益系数往往保持不变,不能实时对系统外界扰动合理调节,控制效果有限。(2)利用人工智能算法,对VSG控制参数自动寻优。文献[17]提出利用改进粒子群算法对阻尼惯量进行自适应调节。文献[18]提出基于径向基函数(radial basis function, RBF)的参数自适应控制策略,实现更加精确的参数调节。但是人工智能算法参数寻优迭代的时间较长,响应较慢。(3)多参数

协同自适应调节,以改善系统的动态性能。文献[19]提出一种转动惯量和阻尼系数以及下垂系数多参数的自适应调节控制策略,文献[20]提出一种基于转动惯量、阻尼系数以及虚拟电感的自适应调节控制策略,二者均能有效抑制扰动时的功率振荡。但是各参数存在复杂的耦合关系以及动态交互特性,很难同时达到最优调节状态。(4)利用非线性控制策略对参数进行自适应调节。文献[21]提出一种模糊控制策略对参数进行自适应调节,文献[22]提出一种自适应滑模补偿控制策略,二者均能改善系统扰动时的功率振荡,但仍然存在功率超调问题。在此基础上,文献[23]提出一种将麻雀算法以及模糊控制相结合的自适应调节控制策略,先利用麻雀算法对初始值寻优,再进行模糊控制,改善系统的响应速度,但是对系统数据采集的准确性较为依赖,且工况改变时还需要重新寻优。

综上,目前VSG自适应控制策略主要存在以下问题:(1)当系统发生扰动时,现有自适应控制策略在VSG换流器上的应用仍存在较大的功率冲击,这会对电力电子元器件产生一定的暂态冲击,进而影响器件的寿命以及可靠性。(2)在系统扰动较小时,自适应调节精度有限,控制效果欠佳。

为此,文中提出一种基于改进模糊自适应的VSG扰动优化控制策略。首先,分析转动惯量和阻尼系数对系统扰动响应的影响;然后,基于传统自适应VSG提出一种根据系统角频率变换量和变换速度实时调节模糊论域的控制方法,打破传统模糊控制在精度和鲁棒性之间的固有矛盾;最后,通过

收稿日期:2025-04-14;修回日期:2025-06-29

基金项目:国家重点研发计划资助项目“配电网高功率密度柔性互联技术和装备”(2023YFB2407400)

MATLAB/Simulink 进行仿真, 结果表明, 文中所提控制策略既能改善系统并网合闸时的功率振荡, 还能在系统发生扰动时使功率和频率快速恢复至额定值。

1 转动惯量和阻尼系数对系统扰动影响

传统 VSG 控制换流器并网拓扑如图 1 所示。图 1 中, R_f 为换流器内等效电阻; L_f 、 C_f 分别为换流器滤波电感、滤波电容; Z_{line} 为线路阻抗; Z_g 为电网侧等效阻抗; $E_{dg} \angle \delta_{dg}$ 、 $U_{PCC} \angle 0$ 分别为换流器出口电压、公共耦合点电压; U_g 为电网侧电压; i_{labc} 、 i_{oabc} 分别为流经滤波电感电流、流经线路阻抗电流; u_{oabc} 为滤波电容电压; P_e 、 Q_e 分别为换流器输出的有功功率、无功功率; P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为有功功率、无功功率参考值; i_{dq} 、 i_{odq} 、 u_{odq} 、 e_{dq} 分别为 i_{labc} 、 i_{oabc} 、 u_{oabc} 、 U 经过 dq 变换后得到的值; θ 、 U 分别为 VSG 有功环和无功环输出的参考相位值、电压幅值。

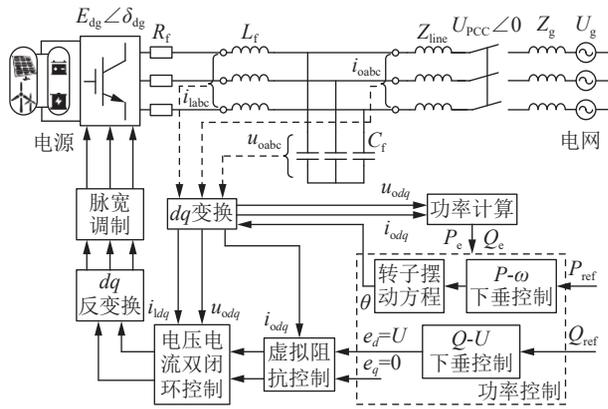


图 1 传统 VSG 控制换流器并网拓扑

Fig.1 Grid-connected topology of converter with traditional VSG control

根据 VSG 控制的基本原理可知, VSG 有功环的摆动方程为:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - T_D = T_m - T_e - D(\omega - \omega_0) \quad (1)$$

式中: J 为转动惯量; D 为阻尼系数; T_m 、 T_e 分别为机械转矩、电磁转矩; T_D 为阻尼转矩; ω 、 ω_0 分别为实际角频率、电网额定角频率。

为了准确衡量不同尺寸和功率等级的同步发电机的惯性, 转动惯量 J 可以利用惯性时间常数 H 衡量^[24], H 为同步发电机在额定转矩下空载启动运行到额定转矩的时间。

$$H = J\omega_0^2/S_n \quad (2)$$

式中: S_n 为 VSG 的额定容量。

假设转速为额定转速, 因为转矩的基准值为 $T_B = S_B/\omega_0$, S_B 为 VSG 的基准容量, 所以转矩和功

率的标么值一致。定义转速偏差 ω_r 和阻尼的标么值 D_p 分别为:

$$\begin{cases} \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{\omega_0} \times \frac{d\omega}{dt} \\ \omega - \omega_0 = \omega_r \omega_0 \\ D_p = \frac{D\omega_0^2}{S_n} \end{cases} \quad (3)$$

联立式(1)和式(3), 可以得到:

$$H \frac{d\omega_r}{dt} = T_m^* - T_e^* - D_p \omega_r = P_m^* - P_e^* - D_p \omega_r \quad (4)$$

式中: T_m^* 、 T_e^* 分别为 T_m 、 T_e 的标么值; P_m^* 、 P_e^* 分别为输入有功功率 P_m 、输出有功功率 P_e 的标么值。经过拉普拉斯变换可以得到:

$$\omega_r = \frac{P_m^* - P_e^*}{Hs + D_p} \quad (5)$$

由式(3)和式(5)可以得到 VSG 换流器的输入、输出功率响应特性, 如图 2 所示。图 2 中, S_E 为同步功率的标么值, 在有功和无功参考值给定时, S_E 为常数^[25]; δ 为换流器功角。

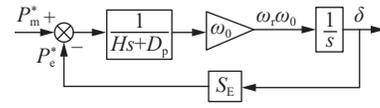


图 2 VSG 小信号分析模型

Fig.2 Small-signal analysis model of VSG

通过图 2 可以得到 VSG 换流器输入有功和输出有功之间的传递函数为:

$$G(s) = \frac{P_e^*(s)}{P_m^*(s)} = \frac{\omega_0 S_E / H}{s^2 + (D_p / H)s + \omega_0 S_E / H} \quad (6)$$

可以看出, VSG 有功环的闭环传递函数为典型的二阶系统, 根据自动控制的相关理论, 可以得到其自然振荡角频率 ω_n 和阻尼比 ξ 分别为:

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\omega_0 S_E / H} \\ \xi = 0.5 D_p \sqrt{1 / (\omega_0 S_E H)} \end{cases} \quad (7)$$

可以看出, 转动惯量 J 对于系统自然振荡角频率 ω_n 和阻尼比 ξ 都有影响, 而阻尼系数 D 只对系统的阻尼比 ξ 有影响, 所以 J 对系统的响应特性影响更为复杂。

通过式(6)可以绘制不同 J 和 D 的根轨迹图, 如图 3 所示。由 D 为 10 不变、 J 从 0.05 增大到 10 的根轨迹图可以看出, 随着 J 的增大, 根轨迹逐渐靠近原点, 系统的阻尼比 ξ 减小, 实部绝对值减小, 系统的衰减速度变慢, 调节时间变长。由 J 为 0.2 不变、 D 从 0 增大到 50 的根轨迹图可以看出, 随着 D 的增大, 系统从不稳定状态进入到欠阻尼状态, 系统的阻尼增大, 但随着 D 继续增大, 系统从临界阻尼进入到过阻尼状态, 系统调节时间变长。

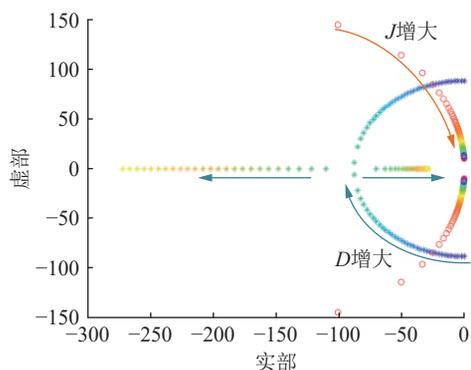


图3 不同J和D下系统的根轨迹

Fig.3 Root locus of systems with different values of J and D

由式(1)可以得出角频率变化量 $\Delta\omega$ 和角频率变化速度 $d\omega/dt$ 的变化关系,如式(8)所示。

$$\begin{cases} \Delta\omega = \frac{T_m - T_e - Jd\omega/dt}{D} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{T_m - T_e - T_D}{J} \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可以看出, $T_m - T_e - Jd\omega/dt$ 恒定时,随着D的增大,角频率变化量 $\Delta\omega$ 会减小;而 $T_m - T_e - T_D$ 恒定时,随着J的增大,角频率变化速度 $d\omega/dt$ 也会减小。

基于上述定性分析,在0.5s增加5kW的负荷,不同的J和D对系统角频率的影响如图4、图5所示。可以看出,随着J和D的变大,负荷波动对系统角频率的影响得到了改善,验证了上述分析。

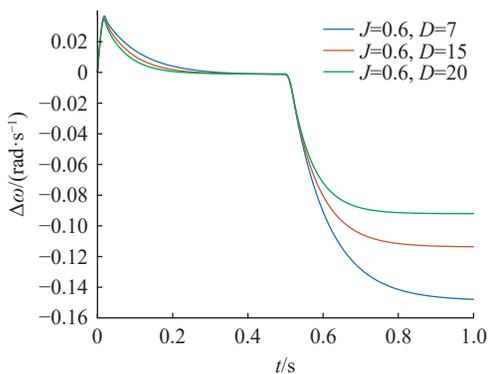


图4 D变化对角频率变化量的影响

Fig.4 Influence of the variation of D on the angular frequency variation

2 转动惯量和阻尼系数自适应调节规则

在系统发生扰动或者合闸启动瞬间, VSG 换流器需要输出更多电磁功率 P_e 以满足新增负荷的改变,直接导致换流器的功角 δ 发生改变。假设负荷从 P_0 突增至 P_1 , VSG 的输出功率会在 P_0 和 P_2 之间来回摆动并最终稳定在 P_1 ,具体的功角特性曲线和角频率特性曲线如图6所示。

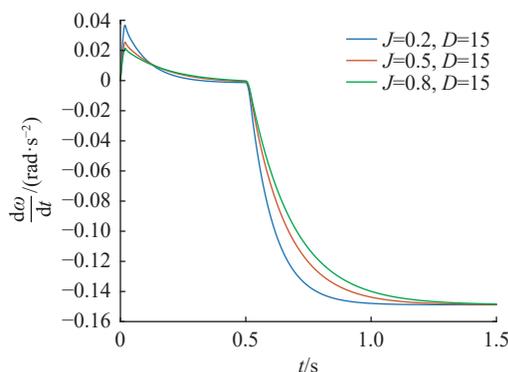
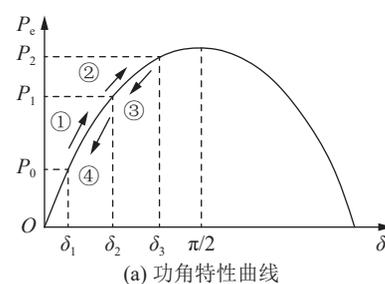
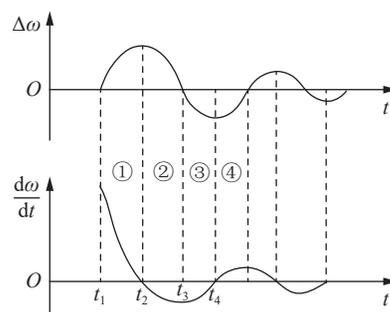


图5 J变化对角频率变化速度的影响

Fig.5 Influence of the variation of J on the changing speed of angular frequency



(a) 功角特性曲线



(b) 角频率特性曲线

图6 系统负荷发生扰动时功角和角频率特性

Fig.6 Characteristic of power angle and angular frequency when the system load is disturbed

将系统扰动的过渡过程分为4个阶段,以阶段②为例进行说明。在阶段②, P_e 由 P_1 逐渐上升至 P_2 , $d\omega/dt < 0$,此时应减小J,提高角频率变化速度 $d\omega/dt$,加速角频率恢复;同时增大D,用更大阻尼使角频率恢复。其他阶段与阶段②类似,故不再赘述。

基于上述负荷扰动时J和D的变化对系统角频率影响的分析,可以得到J和D自适应调节规则,如表1所示。

表1 自适应参数调节规则

Table 1 Adaptive parameter adjustment rules

阶段	$\Delta\omega$	$d\omega/dt$	$\Delta\omega d\omega/dt$	J	D
①	>0	>0	>0	变大	不变
②	>0	<0	<0	变小	增大
③	<0	<0	>0	变大	不变
④	<0	>0	<0	变小	增大

基于函数自适应 VSG 控制一般利用 $\Delta\omega$ 以及 $d\omega/dt$ 乘上固定的增益对 J 和 D 进行实时调整^[26]。相较于采用固定 J 和 D 的传统 VSG 控制, 基于函数自适应 VSG 控制在扰动发生时能起到一定的改善作用, 但是固定的惯量增益 μ_J 和阻尼增益 μ_D 难以应对多样的干扰, 精确性不足, 且在换流器和电网预同步合闸的瞬间容易产生较大的超调, 控制效果较差, 所以文中设计基于改进模糊自适应 VSG 控制解决上述问题。基于比例系数函数自适应 VSG 控制如下:

$$J^* = \begin{cases} J_0 & M \geq \left| \frac{d\omega}{dt} \right| \\ J_0 + \mu_J \frac{|\omega - \omega_0|}{\omega - \omega_0} \times \frac{d\omega}{dt} & M < \left| \frac{d\omega}{dt} \right| \end{cases} \quad (9)$$

$$D^* = \begin{cases} D_0 & M \geq \left| \frac{d\omega}{dt} \right| \cup \left(\Delta\omega \frac{d\omega}{dt} \right) \geq 0 \\ D_0 + \mu_D |\omega - \omega_0| & M < \left| \frac{d\omega}{dt} \right| \cap \left(\Delta\omega \frac{d\omega}{dt} \right) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: J_0 、 D_0 分别为系统设定的初始转动惯量、阻尼系数; M 为启动自适应转动惯量的阈值; J^* 、 D^* 分别为扰动发生时新的转动惯量、阻尼系数。

3 基于模糊自适应 VSG 控制

3.1 模糊控制器隶属度函数设计

给定论域 L 上的一个模糊集合 A , 对于输入数据 $x \in L$, 指定一个唯一的数值 $\mu_A(x) \in [0, 1]$ 与之对应, 称为 x 对 A 的隶属度, 表征论域中的元素 x 属于模糊集合 A 的程度。相当于构造一个映射关系, 称为 A 的隶属度函数:

$$\mu_A : L \rightarrow [0, 1] \quad (11)$$

$\mu_A(x)$ 值越接近零, x 属于 A 的程度越小。 A 为所有输入数据 x 的集合。文中所选 $\Delta\omega$ 和 $d\omega/dt$ 作为输入, 在模糊控制器中分别用 e 和 \dot{e} 表示, ΔJ 和 ΔD 作为输出, 在模糊控制器中用 o 表示。考虑实际系统发生扰动时 $d\omega/dt$ 常因快速波动呈现“毛刺状”特征, 故设计其隶属度函数在零值附近变化更加剧烈, 确保系统在发生较小扰动时也能快速响应。 $\Delta\omega$ 隶属度函数采用均匀化设计, 使其在更宽的区间范围内对系统状态作出响应, 具体隶属度函数见附录 A。为了提高系统的动态响应, 输入和输出的隶属度函数分别设置 5 个模糊子集, 为 {NB, NS, ZO, PS, PB}。其中 N、P 分别代表负、正; B、S 分别代表大、小; ZO 代表为 0。

3.2 模糊语言变量因子的设计

实际应用中, 模糊控制器的输入变量 (e 、 \dot{e}) 和

输出变量 (o) 连续, 比如输入变量 e 、 \dot{e} 的取值范围分别为 $[e_L, e_H]$ 、 $[\dot{e}_L, \dot{e}_H]$, 输出变量 o 的取值范围为 $[o_L, o_H]$, 下标 H、L 分别表示取值范围的上、下限。连续变量 e 、 \dot{e} 、 o 在经过隶属度函数后将变成离散的数集 E 、 \dot{E} 、 O 。误差 E 的论域包含 $2m$ 个变量, 误差变化率 \dot{E} 的论域有 $2n$ 个变量, 同理输出量 O 的论域有 $2l$ 个变量。

为了匹配实际连续变量和模糊后的离散变量的关系, 引入量化因子 k_e 、 $k_{\dot{e}}$ 和比例因子 k_o , 由此实现连续变量和离散变量之间的转换。选取二维模糊控制器, 如图 7 所示。

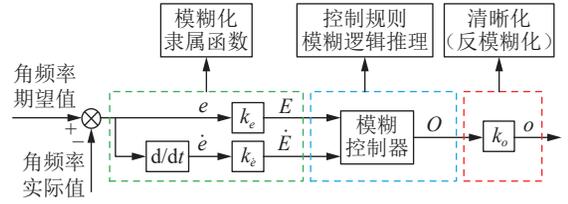


图 7 二维模糊控制器控制框图

Fig.7 Control block diagram of two-dimensional fuzzy controller

系统输入的量化因子可以表示为:

$$\begin{cases} k_e = \frac{2m}{e_H - e_L} \\ k_{\dot{e}} = \frac{2n}{\dot{e}_H - \dot{e}_L} \end{cases} \quad (12)$$

系统输出的比例因子可以表示为:

$$k_o = \frac{o_H - o_L}{2l} \quad (13)$$

通过量化因子和比例因子, e 和 \dot{e} 可转化为模糊化后的离散输入 E 和 \dot{E} :

$$\begin{cases} E = \left\{ \left\langle k_e \left(e - \frac{e_H + e_L}{2} \right) \right\rangle \right\} \\ \dot{E} = \left\{ \left\langle k_{\dot{e}} \left(\dot{e} - \frac{\dot{e}_H + \dot{e}_L}{2} \right) \right\rangle \right\} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\langle \cdot \rangle$ 为对结果取整运算。同理模糊控制器输出的离散变量 O 可以通过比例因子转化为实际连续的输出量:

$$o = k_o O + \frac{o_H + o_L}{2} \quad (15)$$

3.3 模糊控制库规则的设计

模糊控制方法的 2 种主要形式是 Mamdani 和 Takagi-Sugeno 模糊规则, 文中采用 Mamdani 削顶法模糊控制规则^[27-28]。以两规则两输入为例, 当二维输入变量的模糊控制的取值分别为 A^* 和 B^* 时, 根据模糊控制库 R 可以推出模糊输出 C_i 的并集。

依据表 1 的自适应参数调节规则, 最终确定 ΔJ 、 ΔD 调节的 25 个模糊控制规则, 如表 2、表 3 所示。

表 2 ΔJ 模糊控制规则
Table 2 Fuzzy control rules for ΔJ

\dot{e}	e				
	NL	NS	ZO	PS	PL
NL	PL	PS	ZO	NS	NL
NS	PS	PS	ZO	NS	NS
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PS	NS	NS	ZO	PS	PS
PL	NL	NS	ZO	PS	PL

表 3 ΔD 模糊控制规则
Table 3 Fuzzy control rules for ΔD

\dot{e}	e				
	NL	NS	ZO	PS	PL
NL	PL	PS	ZO	NS	NL
NS	PS	PS	ZO	NS	NS
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PS	NS	NS	ZO	PS	PS
PL	NL	NS	ZO	PS	PL

根据上述模糊控制规则可以得到基于模糊自适应 VSG 控制, ΔJ 和 ΔD 与 e 和 \dot{e} 之间的关系如图 8、图 9 所示。

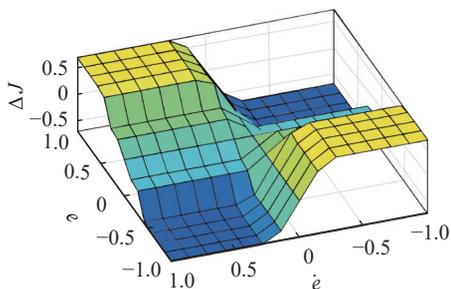


图 8 基于模糊自适应 VSG 转动惯量模糊控制规则
Fig.8 Fuzzy control rules of inertia based on fuzzy adaptive VSG

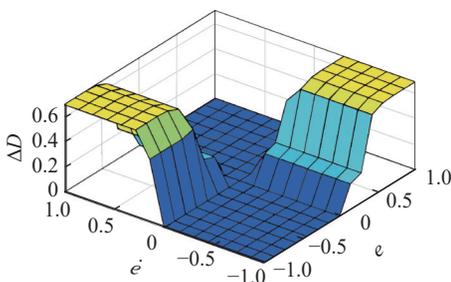


图 9 基于模糊自适应 VSG 阻尼系数模糊控制规则
Fig.9 Fuzzy control rules of damping coefficient based on fuzzy adaptive VSG

4 基于改进模糊自适应 VSG 控制

4.1 改进模糊控制器设计

为获得理想的控制效果,基于模糊自适应 VSG 控制需要增加控制规则的数量^[29-30],这将增加实际

工程中模糊控制器设计的复杂性。

在模糊控制规则和隶属度函数不变的前提下,引入伸缩因子 α 。当 e 和 \dot{e} 增大时,论域扩张,有利于降低系统超调,提高响应速度。当 e 和 \dot{e} 减小时,论域收缩,有利于提高控制精度。论域的动态调节过程如图 10 所示。

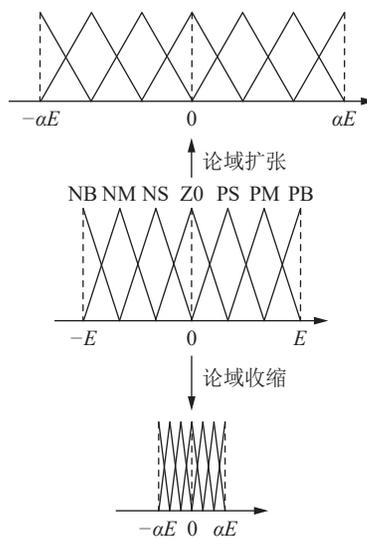


图 10 论域动态调节

Fig.10 Dynamic adjustment of the discourse domain

引入伸缩因子后,输入 e 和 \dot{e} 的论域 $X(e)$ 、 $X(\dot{e})$ 以及输出 o 的论域 $Y(o)$ 可以表示为:

$$\begin{cases} X(e) = [-\alpha_e(x)E, \alpha_e(x)E] \\ X(\dot{e}) = [-\alpha_{\dot{e}}(x)\dot{E}, \alpha_{\dot{e}}(x)\dot{E}] \\ Y(o) = [-\beta(y)O, \beta(y)O] \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\alpha_e(x)$ 、 $\alpha_{\dot{e}}(x)$ 分别为输入 e 和 \dot{e} 对应的伸缩因子; $\beta(y)$ 为输出 o 对应的伸缩因子。加入伸缩因子后基于改进模糊自适应 VSG 控制框图如图 11 所示。

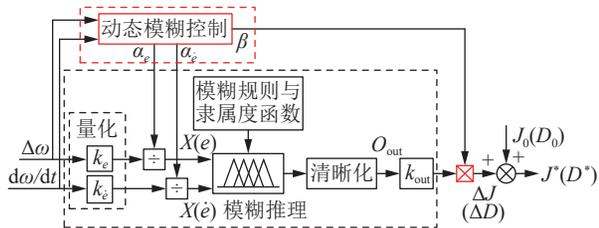


图 11 基于改进模糊自适应 VSG 控制框图
Fig.11 Control block diagram of improved fuzzy adaptive VSG

4.2 论域伸缩因子的设计

论域的调节机制是根据 e 和 \dot{e} 计算论域的伸缩因子 α_e 、 $\alpha_{\dot{e}}$ 和输出变量 ΔJ 和 ΔD 的伸缩因子 β ,从而改变输入、输出的论域大小。依据对称性、单调性、避零性、正规性的原则,采用基于模糊推理方法设计输出论域伸缩因子。输入伸缩因子 $\alpha(x)$ 具体函数如下:

$$\alpha(x) = 1 - \lambda e^{-kx^2} \quad (17)$$

式中: λ 、 k 为函数式的系数。一般取 $\lambda \in (0, 1)$, λ 越大, 输入论域压缩的越明显; k 越大, 论域的峰值越大。

根据上述分析并多次实验, 文中设计的 $\alpha_e(x)$ 和 $\alpha_{\dot{e}}(x)$ 曲线如图12所示, 函数如式(18)、式(19)所示。

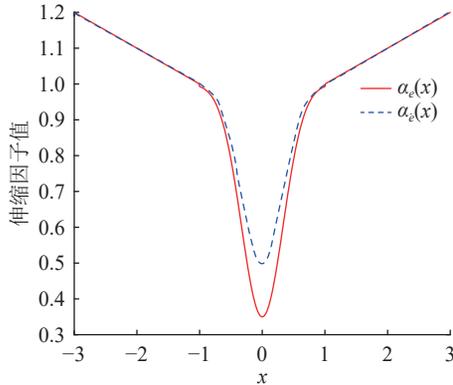


图12 输入变量论域伸缩因子

Fig.12 Scaling factor of the discourse domain for input variables

$$\alpha_e(x) = \begin{cases} 1 - 0.65e^{-4.5x^2} & -1 \leq x \leq 1 \\ 0.9 + 0.1|x| & |x| > 1 \end{cases} \quad (18)$$

$$\alpha_{\dot{e}}(x) = \begin{cases} 1 - 0.5e^{-4.5x^2} & -1 \leq x \leq 1 \\ 0.9 + 0.1|x| & |x| > 1 \end{cases} \quad (19)$$

对于输出变量伸缩因子采用函数整定较为复杂, 所以采用模糊控制规则进行实时调节^[31-32]。输出变量的伸缩因子根据 e 以及 \dot{e} 进行合理调整。

e 和 \dot{e} 误差较大时, 模糊控制规则无须进行细致划分, 但是误差变小时, 传统的自适应控制策略效果不佳。适当收缩论域, 可实现对 J 和 D 更加精确的控制, 从而提高响应速度。 ω 的初始论域为 $[0, 1]$, 输出变量伸缩因子 β 模糊控制规则如表4所示。

表4 β 模糊控制规则

Table 4 Fuzzy control rules for β

\dot{e}	e				
	NL	NS	ZO	PS	PL
NL	PL	PS	ZO	PS	PL
NS	PS	PS	ZO	PS	PS
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PS	PS	PS	ZO	PS	PS
PL	PL	PS	ZO	PS	PL

基于改进模糊自适应VSG控制流程如图13所示。该控制策略采用监测-响应-调节的闭环逻辑: 首先通过监测模块捕捉系统的变化, 判断是否触发改进模糊控制器。在系统发生扰动时, 数据采集单元迅速获取系统的角频率差值 e 以及角频率变化率 \dot{e} , 经伸缩因子计算模块处理后, 输出论域动态调整

参数。该参数随即传入模糊控制器, 生成新的转动惯量 J^* 和阻尼系数 D^* 返回至VSG的摇摆方程。

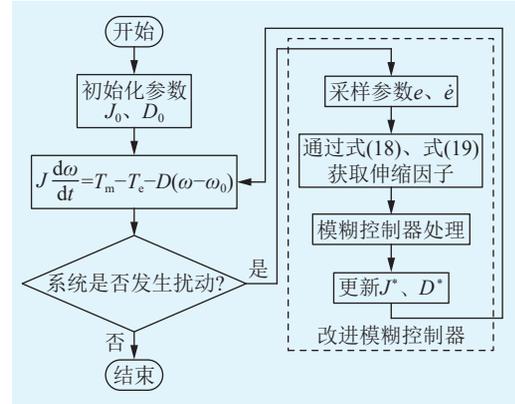


图13 基于改进模糊自适应VSG控制流程

Fig.13 Flow chart of improved fuzzy adaptive VSG control

5 仿真分析

5.1 仿真模型及仿真参数

为验证文中 J 和 D 对系统响应的理论分析以及控制策略的有效性, 在MATLAB/Simulink中搭建图1所示单机VSG并网模型, 具体仿真参数见表5。表中, V_{dc} 为直流侧电压; L_g 为电网侧电感; f_n 为电网额定频率。

表5 仿真系统主要参数

Table 5 Main parameters of the simulation system

参数	数值	参数	数值
V_{dc}/V	1 000	U_g/V	380
L_t/mH	2	$C_f/\mu F$	20
L_g/mH	0.2	$\omega_0/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	100π
$J_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.6	$D_0/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1})$	30
f_n/Hz	50	k_e	0.5
k_e	0.05	k_o	3

5.2 逆变电源合闸仿真验证

运行工况1: 逆变电源在离网状态下运行至1s时, 给VSG换流器一个预同步合闸的信号, 仿真总时长为3s, 系统有功和频率波形如图14、图15所示。

通过图14、图15可以看出, 固定参数VSG控制下预同步合闸瞬间将会产生较大的功率、频率冲击, 严重影响电网的电能质量。采用函数自适应VSG控制和模糊自适应VSG控制后, 系统的有功功率和频率超调量并没有太大改善, 采用函数自适应VSG控制后有功超调量仅降低了0.1%, 采用模糊自适应VSG控制后有功超调量仅降低了0.21%。而采用改进模糊自适应VSG控制后, 系统无超调量, 且稳定时间和其他控制策略仅相差0.13s。仿

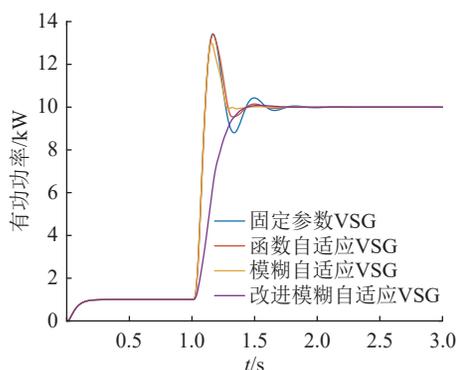


图 14 逆变电源合闸过程换流器侧输出有功

Fig.14 Active power output on the converter side during the closing process of the inverter power supply

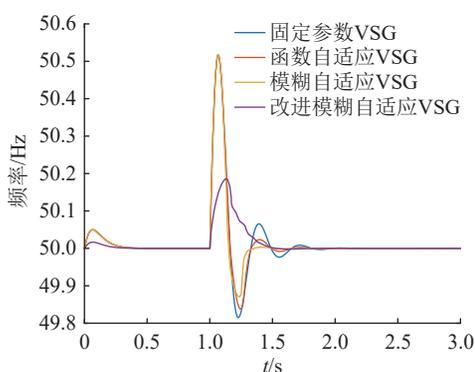


图 15 逆变电源合闸过程系统频率

Fig.15 System frequency during the closing process of the inverter power supply

真结果可以证明文中所提控制策略在 VSG 换流器合闸瞬间能有效改善系统电能质量。

5.3 有功负荷改变仿真验证

运行工况 2: 逆变电源在并网状态下运行至 3 s 时, 系统有功负荷从 10 kW 增加到 12 kW, 在 4.5 s 时有功负荷恢复到 10 kW, 仿真总时长为 6 s。负荷突变期间系统有功功率、频率如图 16、图 17 所示。

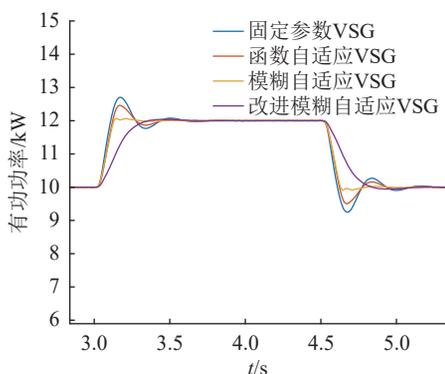


图 16 有功负荷突变时换流器侧输出有功

Fig.16 Active power output on the converter side when the active load suddenly changes

由图 16 可以看出, 函数自适应 VSG 控制和模糊自适应 VSG 控制相较于固定参数 VSG 控制, 在

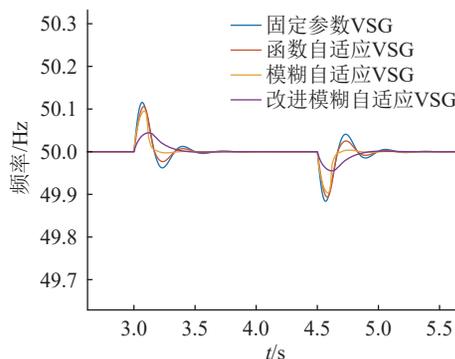


图 17 有功负荷突变时系统频率

Fig.17 System frequency when the active load suddenly changes

有功超调量方面虽然有一定改善, 但是超调量仅降低了 1.67%, 控制效果不佳。相比之下, 采用改进模糊自适应 VSG 控制后超调量更低, 降低了 54.17%。

如图 17 所示, 采用改进模糊自适应 VSG 控制, 可以有效改善系统的频率超调现象, 且稳定时间相较于其他控制更短, 仅为 0.35 s, 充分证明了文中所提控制策略在系统负荷发生突变时, 能有效抑制系统波动, 调节能力更快, 抗干扰能力更好。

5.4 电网频率发生跌落时仿真验证

运行工况 3: 逆变电源运行在并网状态, 运行至 3 s 时, 电网频率从 50 Hz 跌落到 49.85 Hz, 仿真总时长为 6 s。电网频率跌落期间系统有功功率、频率如图 18、图 19 所示。

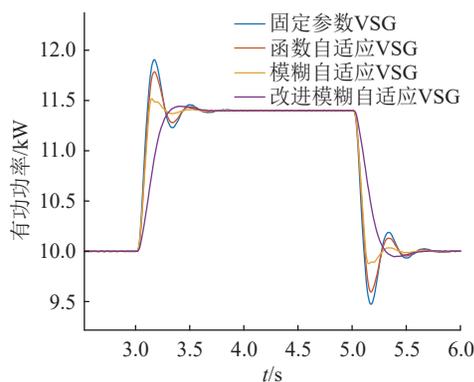


图 18 电网频率跌落时换流器侧输出有功

Fig.18 Active power output on the converter side when the grid frequency drops

由图 18 可以看出, 频率跌落时, 系统有功功率在 3 s 时从 10 kW 增发至 11.4 kW, 验证了 VSG 换流器在频率跌落时一次调频的功能, 且在有功增发的过程中, 采用改进模糊自适应 VSG 控制没有超调量, 而其他控制超调量最低有 0.87%, 且改进模糊自适应 VSG 控制能够快速到达有功增发值, 稳定时间仅为 0.31 s。

由图 19 可以看出, 其他控制超调量达到 0.1%,

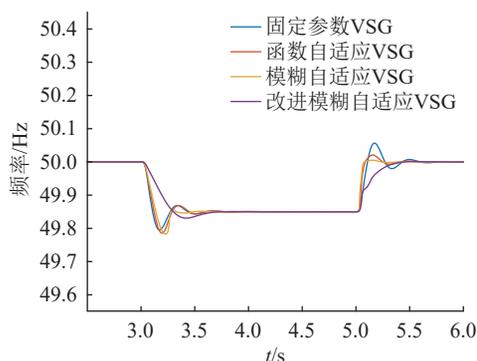


图 19 电网频率跌落时系统频率

Fig.19 System frequency when the grid frequency drops

而改进模糊自适应 VSG 控制超调量仅有 0.01%, 系统的频率过渡过程更加平滑, 验证了文中所提控制策略的有效性。

6 结论

文中提出基于改进模糊自适应的 VSG 扰动优化控制策略, 并在 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建单机 VSG 并网模型, 与其他 VSG 自适应控制进行对比验证。结论如下:

(1) 将基于改进模糊自适应 VSG 控制和固定参数 VSG 控制、函数自适应 VSG 控制、未加入动态伸缩因子的模糊自适应 VSG 控制进行对比, 验证了基于改进模糊自适应 VSG 控制在换流器合闸期间频率更加稳定, 能显著降低合闸瞬间的功率和频率冲击。

(2) 通过模拟 VSG 换流器在负荷扰动、频率波动等工况下的运行情况, 验证了基于改进模糊自适应 VSG 控制能够有效减少外部扰动对系统稳定性的不良影响, 展现出更强的鲁棒性。

后续研究将进一步考虑 VSG 换流器在孤网运行和并网运行下发生不平衡故障时的参数自适应问题, 并将文中单机并网模型拓展到多机并联运行, 以实现适合各种工况的参数自适应控制。

致谢

本文得到苏州市关键核心技术“揭榜挂帅”项目“新型电力系统配网柔性调控设备研发”(SYG2024 048)资助, 谨此致谢!

附录见本刊网络版, 可点击 <https://www.epet-info.com/dlgcjs/article/abstract/20250513>, 阅读全文。

参考文献:

[1] 孙压宁, 任永峰, 王欢, 等. 基于功角偏差反馈的构网型储能暂态功角稳定增强方法[J]. 电力工程技术, 2025, 44(2): 90-99.
SUN Yaning, REN Yongfeng, WANG Huan, et al. Improve-

ment method for grid-forming energy storage power angle stabilization in transient state based on power angle deviation feedback[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(2): 90-99.

[2] 韩民晓, 范溢文, 刘金峻, 等. 换流器型电网的理念与探索[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 539-555.

HAN Minxiao, FAN Yiwen, LIU Jinjun, et al. Concept and practice of converter-based grid[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 539-555.

[3] 黎博, 陈民铀, 钟海旺, 等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 555-581.

LI Bo, CHEN Minyou, ZHONG Haiwang, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 555-581.

[4] 贾焦心, 杨添淇, 颜湘武, 等. 电力电子并网装备等效惯量评估研究进展[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9): 3-10.

JIA Jiaoxin, YANG Tianqi, YAN Xiangwu, et al. Research progress on equivalent inertia estimation of grid-connected power electronic devices[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 3-10.

[5] 沈赋, 李施伟, 王健, 等. 融合储能的光伏发电系统并网逆变器建模与稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(19): 131-143.

SHEN Fu, LI Shiwei, WANG Jian, et al. Modeling and stability analysis of a photovoltaic grid-connected inverter integrated with an energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(19): 131-143.

[6] 刘学成, 杨军, 申锦鹏, 等. 基于系统动力学模型的电力系统等效惯量时空演变趋势研究[J]. 全球能源互联网, 2024, 7(5): 579-590.

LIU Xuecheng, YANG Jun, SHEN Jinpeng, et al. Analysis of spatiotemporal evolution trend of equivalent inertia in power system based on system dynamics model[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2024, 7(5): 579-590.

[7] 钟庆昌. 虚拟同步机与自主电力系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 336-348.

ZHONG Qingchang. Virtual synchronous machines and autonomous power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 336-348.

[8] 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.

[9] 蒋小亮, 李元臣, 郝元钊, 等. 计及新能源虚拟惯量的电力系统等效惯量评估[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(4): 169-176.

JIANG Xiaoliang, LI Yuanchen, HAO Yuanzhao, et al. Evaluation of power system equivalent inertia considering new energy virtual inertia[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 169-176.

- [10] 王吉利, 占领, 张钢, 等. 提高构网型储能系统功角稳定性的附加阻尼方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(4): 75-81,103.
WANG Jili, ZHAN Ling, ZHANG Gang, et al. Additional damping method for improving the power angle stability of grid-forming energy storage system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 75-81,103.
- [11] 赵炳洋, 赵波, 胡娟, 等. 考虑 VSG 构网储能暂态与稳态优化的自适应策略[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 39-47.
ZHAO Bingyang, ZHAO Bo, HU Juan, et al. Adaptive strategy considering transient and steady-state optimization of VSG grid-forming energy storage[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 39-47.
- [12] 杨旭红, 金宏艳, 刘众鑫, 等. 光储逆变器的虚拟同步机自适应控制策略研究[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(2): 181-189.
YANG Xuhong, JIN Hongyan, LIU Zhongxin, et al. Research on adaptive control strategy of virtual synchronous machine applied for the photovoltaic and energy storage inverter[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 181-189.
- [13] 耿昊翔, 王维俊, 唐帅, 等. 虚拟同步发电机的参数自适应控制策略研究[J]. 电气工程学报, 2021, 16(3): 17-24.
GENG Haoxiang, WANG Weijun, TANG Shuai, et al. Research on parameter adaptive control strategy of virtual synchronous generator[J]. Journal of Electrical Engineering, 2021, 16(3): 17-24.
- [14] 崔杨, 马博余, 戴汉扬, 等. 基于缓冲函数和阻尼切换的构网型储能参数自适应调整方法[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(10): 77-86.
CUI Yang, MA Boyu, DAI Hanyang, et al. Adaptive adjustment method for grid-forming energy storage parameters based on buffer functions and damping switching[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(10): 77-86.
- [15] REN H P, CHEN Q, ZHANG L L, et al. Parameter adaptive strategy for virtual synchronous generator control[J]. Control Theory and Applications, 2020, 37(12): 2571-2580.
- [16] 王立娜, 王逸超, 谭丽平, 等. 基于自适应指数函数的变参数 VSG 控制[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(3): 124-131.
WANG Lina, WANG Yichao, TAN Liping, et al. Variable parameter VSG control based on adaptive exponential function[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(3): 124-131.
- [17] 卢盛阳, 朱钰, 陈涛, 等. 基于改进粒子群算法的阻尼惯量自适应控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(4): 68-75.
LU Shengyang, ZHU Yu, CHEN Tao, et al. Adaptive control strategy of damping inertia based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2024, 36(4): 68-75.
- [18] 张子星, 赵晋斌, 曾志伟, 等. 基于 RBF 的 VSG 虚拟惯量和动态阻尼补偿自适应控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 155-164.
ZHANG Zixing, ZHAO Jinbin, ZENG Zhiwei, et al. VSG virtual inertia and dynamic damping compensation adaptive control based on RBF[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 155-164.
- [19] 陈杰, 程静, 王维庆, 等. 应用多参数协同自适应方法的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(23): 74-85.
CHEN Jie, CHENG Jing, WANG Weiqing, et al. Control strategy for a virtual synchronous generator using a multi-parameter cooperative adaptive method[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(23): 74-85.
- [20] 吴卓, 李自成, 刘江, 等. 基于 VSG 的储能变流器 JDL 协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(7): 112-122.
WU Zhuo, LI Zicheng, LIU Jiang, et al. VSG-based coordinated JDL control strategy for energy storage converters[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(7): 112-122.
- [21] LYU L, WANG X S, ZHANG L, et al. Fuzzy control based virtual synchronous generator for self-adaptative control in hybrid microgrid[J]. Energy Reports, 2022, 8: 12092-12104.
- [22] 林俊芳, 何国锋, 张国勇, 等. 基于自适应模糊滑模补偿的 VSG 功率振荡抑制策略[J]. 可再生能源, 2024, 42(8): 1083-1088.
LIN Junfang, HE Guofeng, ZHANG Guoyong, et al. VSG power oscillation suppression strategy based on adaptive fuzzy sliding mode compensation[J]. Renewable Energy Resources, 2024, 42(8): 1083-1088.
- [23] 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.
- [24] 李志军, 杨梦伟, 张家安, 等. VSG 惯量及阻尼的协同自适应控制研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(1): 36-43.
LI Zhijun, YANG Mengwei, ZHANG Jia'an, et al. Research on synergistical adaptive control of inertia and damping of VSG[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(1): 36-43.
- [25] 温春雪, 陈丹, 胡长斌, 等. 微网逆变器的 VSG 转动惯量和阻尼系数自适应控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(17): 120-126, 183.
WEN Chunxue, CHEN Dan, HU Changbin, et al. Self-adaptive control of rotational inertia and damping coefficient of VSG for converters in microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 120-126,183.
- [26] 李东东, 朱钱唯, 程云志, 等. 基于自适应惯量阻尼综合控制算法的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 72-77.
LI Dongdong, ZHU Qianwei, CHENG Yunzhi, et al. Control

- strategy of virtual synchronous generator based on self-adaptive rotor inertia and damping combination control algorithm[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(11): 72-77.
- [27] 林歆悠, 王召瑞. 应用粒子群算法优化模糊规则的自适应多目标控制策略[J]. *控制理论与应用*, 2021, 38(6): 842-850.
LIN Xinyou, WANG Zhaorui. Adaptive multi-objective control strategy based on particle swarm optimization algorithm optimized fuzzy rules[J]. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(6): 842-850.
- [28] 余同, 刘军, 孙维凡. 基于模糊理论的内置式永磁同步电机弱磁控制仿真研究[J]. *电气工程学报*, 2019, 14(1): 1-8.
YU Tong, LIU Jun, SUN Weifan. Weak magnetic control of permanent magnet synchronous motor based on fuzzy theory[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2019, 14(1): 1-8.
- [29] 宋栓军, 曹佳豪, 郭晓虎. 手指康复外骨骼的变论域模糊PID控制研究[J]. *传感器与微系统*, 2025, 44(4): 31-34, 39.
SONG Shuanjun, CAO Jiahao, GUO Xiaohu. Research on variable universe fuzzy PID control of finger rehabilitation exoskeleton[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2025, 44(4): 31-34, 39.
- [30] LIU J Q, JIANG Y. Adaptive fuzzy control for high-order nonlinear systems with time-varying full-state constraints and input saturation[J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2023, 37(3): 710-725.
- [31] 孙立新, 刘明立, 高春艳, 等. 自适应伸缩因子的变论域模糊控制的AGV纠偏[J]. *现代制造工程*, 2022(10): 21-26.
SUN Lixin, LIU Mingli, GAO Chunyan, et al. AGV deviation correction of variable universe fuzzy control with adaptive expansion factor[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2022(10): 21-26.
- [32] 张宪霞, 唐胜杰, 俞寅生. 基于模糊神经网络在线自学习的多智能体一致性控制[J]. *自动化学报*, 2025, 51(3): 590-603.
ZHANG Xianxia, TANG Shengjie, YU Yinsheng. Multi-agent consensus control based on online self-learning fuzzy neural network[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2025, 51(3): 590-603.

作者简介:



王志祥

王志祥(1998), 男, 硕士在读, 研究方向为交直流微网换流器接口技术、直流微电网控制 (E-mail: 120232201526@ncepu.edu.cn);

潘国清(1982), 男, 硕士, 从事电力设备研发工作;

袁宇波(1975), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 从事中低压交直流电力系统控制与保护、数字配电网工作。

Disturbance optimization control of virtual synchronous generator based on improved fuzzy adaptive method

WANG Zhixiang¹, PAN Guoqing², YUAN Yubo³, XIE Wenqiang³, HAN Minxiao¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Suzhou Qingke Electrical Co., Ltd., Suzhou 215000, China; 3. State Grid Jiangsu

Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: To address the issues of poor dynamic response and insufficient robustness in virtual synchronous generator (VSG) during grid connection, closing, or system disturbances, an improved fuzzy adaptive control strategy for VSG disturbance optimization is proposed. Firstly, a small-signal model of traditional VSG control is established to analyze the influence mechanism of moment of inertia and damping coefficient on the system disturbance response. Furthermore, combining the power-angle curve and frequency characteristic curve of VSG during disturbances, adaptive adjustment rules for the moment of inertia and damping coefficient are constructed. On this basis, the membership functions and control rule base of the fuzzy controller are designed, and the parameter adjustment mechanism of the fuzzy controller is established. A universe scaling factor is further introduced to achieve dynamic adjustment of the fuzzy universe. Finally, a single VSG grid-connected model is built on the MATLAB/Simulink simulation platform. The simulation results show that the proposed control strategy can effectively suppress power oscillations and improve the adaptability of VSG during load disturbances, frequency fluctuations, and grid connection/closing stages.

Keywords: virtual synchronous generator (VSG); adaptive parameters; fuzzy control; scaling factor; universe of discourse adjustment; power oscillation

(编辑 方晶)