

虚拟同步发电机惯量和阻尼参数模糊自适应控制策略

刘子阳, 江卫华, 胡为兵

(武汉工程大学电气信息学院, 湖北 武汉 430000)

摘要: 为了提高虚拟同步发电机(VSG)控制方法在新能源系统并网时对系统的支撑能力, 在传统VSG的基础上设计了一种VSG惯量和阻尼双参数模糊自适应控制策略, 将系统角速度偏差及角速度偏差的变化率作为输入, 经设计的模糊规则实现双参数自适应控制。在MATLAB/Simulink中建立数学模型, 与传统VSG控制进行对比实验, 结果表明模糊自适应控制策略在对抗干扰时可有效支撑系统的频率及抑制功率的波动, 进一步提高了新能源并网系统的稳定性。

关键词: 虚拟同步发电机; 转动惯量; 阻尼; 模糊自适应控制; 稳定性

Fuzzy adaptive control strategy for inertia and damping parameters of virtual synchronous generator

LIU Ziyang, JIANG Weihua, HU Weibing

(School of electrical information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430000, China)

Abstract: In order to improve the support ability of virtual synchronous generator (VSG) control method to the system when the new energy system is connected to the grid, a two-parameter fuzzy adaptive control strategy of VSG inertia and damping is designed based on the traditional VSG. The angular velocity deviation and the change rate of angular velocity deviation are taken as the input, and the designed fuzzy rules realize the two-parameter adaptive control. The mathematical model is established in MATLAB / Simulink and compared with the traditional VSG control. The results show that the fuzzy adaptive control strategy can effectively support the frequency of the system and suppress the fluctuation of power when resisting interference, and further improve the stability of the new energy grid connected system.

Key words: virtual synchronous generator; moment of inertia; damping; fuzzy adaptive control; stability

0 引言

近年来, 为了应对全球的能源危机, 风力发电、光伏等新能源得到了大规模的并网应用, 这导致电力系统的稳定性受到严重影响^[1-3]。一般情况下, 传统的发电系统通过同步发电机并入电网, 可以通过释放转子动能为系统提供惯性, 进而维持系统的稳定, 但是可再生能源通过电力电

子器件接入电网, 并网逆变器具有的惯量较小, 不能提供必要的功率与频率支撑^[4-5]。为了解决可再生能源电力系统惯性低、频率稳定性较差等问题, 近些年提出的虚拟同步发电机(VSG)控制技术通过模拟同步发电机的特性为系统引入了转动惯量和阻尼, 可有效提高系统抑制频率波动的能力^[6-7]。

VSG控制策略是通过参数的形式将阻尼和惯性引入到系统中, 因此利用其参数灵活可调的优点, 提出了参数自适应控制算法, 进而提高VSG在各种环境下的适用性以及控制效果的优越性。文献[8]采用惯量自适应调节的控制方法, 在频率出现波动时为系统提供合适的惯量参数, 降低了系统的超调, 缩短了动态响应时间。文献[9]提出了一种更符合微电网特点的无模型自适应算法, 通过预估下一时刻转动惯量的大小来为电网提供支撑。文献[10]将角速度和角速度变化率作为输入, 通过模糊理论实现惯量自适应控制, 进而维持系统的稳定, 相比其他提供惯量补偿的方法具有明显优越性。文献[11]通过同时调节自适应控制转动惯量和下垂系数来应对电网中出现的电压故障问题, 缩短了系统电压恢复正常的时间。文献[12]提出了一种阻尼自适应调节的控制方法, 抑制频率和电压的振荡, 该方法通过阻尼和频率最大偏差量的动态关系来自动调节阻尼参数。文献[13]分析了阻尼系数和系统振荡之间的关系, 提出了一种基于阻尼模糊的自适应控制方法, 显著提高了VSG的性能。上述文献均只考虑了VSG其中的一个参数, 并未分析在系统受到扰动时, 同时调节惯量与阻尼系数对系统稳定性能的改善情况。

1 虚拟同步发电机工作原理

VSG主要结构由主电路与控制电路组成, 其中主电路由电压源、逆变器和滤波电路等组成, 而控制电路主要由有功功率-频率控制环节、励磁控制环节和测量计算环节等多个部分组成, VSG控制系统的控制框图如图1所示。

图1中, U_{dc} 为直流电压源; L_f 为滤波电感; R_f 为滤波电阻; C_f 为滤波电容; L_g 为网侧电感; I_{abc} 和 U_{abc} 分别为电网侧电流和电压; I_{fabc} 为逆变器输出电流; P 和 Q 分别为电网侧输出的有功功率和无功功率的实际测量值; P_{ref} 和 Q_{ref} 为有功功率和无功功率的给定值; E 为合成电压的参考值。

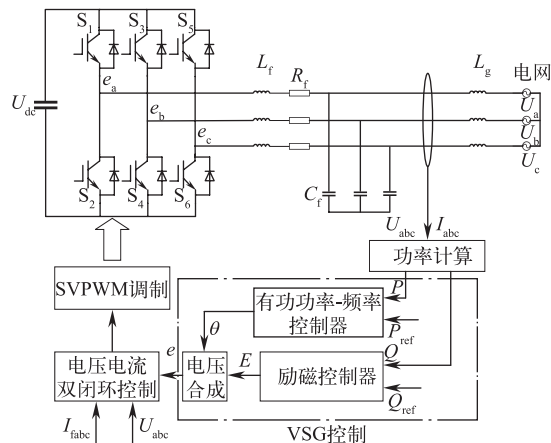


图1 虚拟同步发电机控制框图

Fig. 1 Control block diagram of VSG

VSG控制方法能够为系统带来惯性, 本质上是因为通过引入同步发电机的转子方程来模拟出同步发电机的特性。同步发电机的转子运动方程为(磁极对数为1)

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

式中, J 为转动惯量; D 为阻尼系数; T_m 为机械转矩; T_e 为电磁转矩; ω 为实际角速度; ω_n 为额定角速度; P_m 为机械功率; P_e 为电磁功率; θ 为VSG的功角。

首先有功功率-频率控制环节通过引入转子运动方程, 把惯量和阻尼代入系统, 对提高系统的稳定性具有关键作用, 有功功率-频率控制关系式为

$$P_m - P_{ref} = K_p(f_{ref} - f) \quad (2)$$

式中, P_{ref} 为有功功率参考值; f_{ref} 为频率给定值; f 为频率实际值; K_p 为功频下垂调节系数。

VSG有功功率-频率控制结构如图2所示。

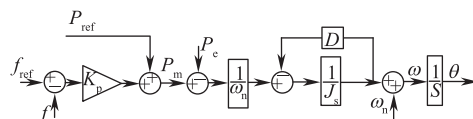


图2 VSG有功功率-频率控制结构图

Fig. 2 Active power frequency control structure diagram

然后VSG励磁控制器作用是控制无功功率和端电压，这里采用一阶惯性环节简化建模，得到关系式为

$$K \frac{dE}{dt} = K_q (Q_{\text{ref}} - Q_0) + (U_n - U_0) \quad (3)$$

式中， Q_{ref} 为无功电压给定值； Q_0 为无功功率测量值； K_q 为无功功率下垂调节系数； U_n 为输出电压的额定值； U_0 为输出电压的测量值； E 为输出的调制电压。

励磁控制结构如图3所示。

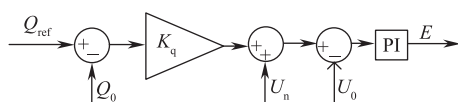


图3 励磁控制结构图

Fig. 3 Excitation control structure diagram

最后在电压合成环节中综合以上得到的电压参考值和相角后，可得到VSG的输出电压为

$$e = \begin{pmatrix} \sqrt{2}E \sin \theta \\ \sqrt{2}E \sin(\theta - 2/3\pi) \\ \sqrt{2}E \sin(\theta + 2/3\pi) \end{pmatrix} \quad (4)$$

2 参数模糊自适应控制

2.1 惯量和阻尼参数分析

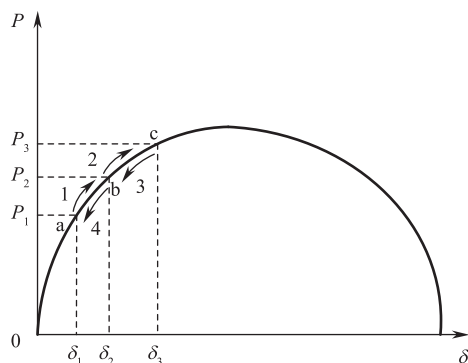
将式(1)进行适当变化可得

$$\Delta\omega = \frac{T_m - T_e - J \frac{d\omega}{dt}}{D} \quad (5)$$

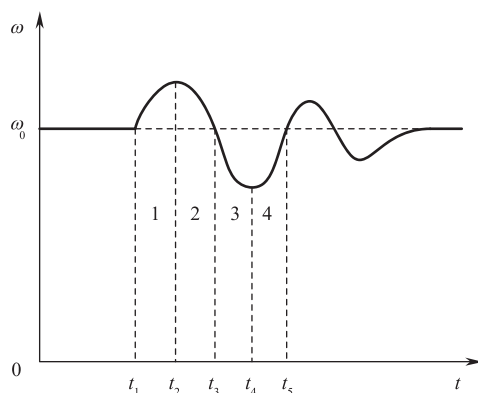
$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_m - T_e - D\Delta\omega}{J} \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可知，在 T_m 和 T_e 不变时，可以通过适当调节 J 和 D 的值来控制角速度偏差量和角速度变化率的变化，所以转动惯量 J 和阻尼系数 D 是决定VSG并网稳定性性能的关键参数。

VSG的功角特性曲线和角速度振荡曲线如图4所示。根据图4中显示的实际情况，把系统受到扰动的变化过程简单地分为4个阶段，具体分析调节虚拟惯量和阻尼系数对角速度偏差、角速度变化率的影响。



(a) 功角曲线



(b) 频率振荡曲线

图4 功角和频率特性曲线

Fig. 4 Power angle and frequency characteristic curve

在第1阶段($t_1 \sim t_2$)中，由于有功功率突增，角速度也在增加， $\Delta\omega > 0$ ，角速度变化率大于零，即 $d\omega/dt > 0$ 。由式(5)和式(6)可知，可以增加 J 和 D 来抑制角速度的增加和减小角速度变化率；在第2阶段($t_2 \sim t_3$)中，角速度变化率小于零，角频率从最大值开始减小但是仍大于额定值，即 $\Delta\omega > 0$ ， $d\omega/dt < 0$ ，所以可以减小 J 的值和适当增大 D 的值来加快角频率恢复到正常值的速度；在第3阶段($t_3 \sim t_4$)中，角速度减小到额定值水平以下，所以角速度偏差小于零，角速度变化率也小于零，即 $\Delta\omega < 0$ ， $d\omega/dt < 0$ ，此时角频率正在偏离额定角频率，所以应该同时增大 J 和 D ；同理在第四阶段($t_4 \sim t_5$)中，角速度偏差小于零，角速度变化率大于零，即 $\Delta\omega < 0$ ， $d\omega/dt > 0$ ，所以应该减小 J 和增大 D 。因此角速度偏差及角速度变化率共同决定着转动惯量和阻尼系数的选取，整理惯量和阻尼控制规律见表1。

表 1 惯量和阻尼控制规律

Tab.1 Inertia and damping control law

阶段	角速度偏差	角速度变化率	转动惯量	阻尼系数
1	> 0	> 0	增大	增大
2	> 0	< 0	减小	增大
3	< 0	> 0	增大	增大
4	< 0	< 0	减小	增大

2.2 模糊控制器设计

根据VSG功频控制的需要,设计双输入双输出结构的模糊控制器,选取角速度偏差 e 和角速度变化率 e_c 作为模糊控制器的输入,转动惯量的补偿项 J_f 和阻尼系数的补偿项 D_f 作为模糊控制器的输出,则模糊控制框图如图5所示。

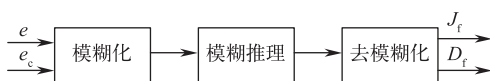


图 5 VSG 参数模糊控制原理框图

Fig.5 Functional block diagram of VSG parameter fuzzy control

首先设置模糊控制器的输入和输出的模糊集均为{NB、NS、ZO、PS、PB},即{负大,负小,零,正小,正大}。将输入的角频率和角频率变化率的论域设定为 $[-1,1]$,输出转动惯量变化范围为 $[-0.2,0.2]$,阻尼系数变化范围为 $[-4,4]$ 。隶属度函数则选择三角形函数。

然后依据上节中的理论分析和表1制定模糊规则,见表2和表3,表中第一行为 e ,第一列为 e_c 。

表 2 惯量 J 的模糊规则表

Tab. 2 Fuzzy rule table of J

J	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	PB	PB	PS	NB	NB
NS	PS	PS	PS	NS	NS
ZO	PS	ZO	ZO	ZO	NS
PS	ZO	NS	ZO	PS	ZO
PB	NB	NB	NS	PB	PB

表 3 阻尼 D 的模糊规则表

Tab. 3 Fuzzy rule table of D

D	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	PB	PB	ZO	ZO	ZO
NS	PS	PS	ZO	ZO	ZO
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	PS	PS
PB	ZO	ZO	ZO	PB	PB

最后,采用去模糊化方法选择重心法。输入量经过模糊控制可以得到转动惯量的补偿项 J_f 和阻尼系数的补偿项 D_f ,那么结合初始设定值可以得到模糊自适应控制下VSG转动惯量 J 和阻尼系数 D 的参考值为

$$\begin{cases} J = J_0 + K_J J_f \\ D = D_0 + K_D D_f \end{cases} \quad (7)$$

式中, J_0 和 D_0 分别为惯量和阻尼的初始设置值; K_J 和 K_D 分别为惯量和阻尼补偿项的调节系数。

3 仿真分析

3.1 模型搭建与仿真条件

为了验证模糊自适应VSG控制的优越性,在MATLAB/Simulink环境下搭建VSG控制的并网模型,如图6所示。通过测量得到的并网电压、电流可计算出 P 、 Q 功率实际值,在模糊自适应VSG模块中,将 P 、 Q 实际值分别与参考值进行比较,经控制可得到VSG电压的幅值和相角,然后输入到VSG参考电压合成模块中,生成三相电压的参考值,再经过电压、电流双闭环控制和SVPWM调制模块得到逆变器控制信号,实现对主电路模块中逆变器的控制。其中模糊自适应VSG控制仿真模型如图7所示,仿真参数见表4。

在给定的有功功率参考值发生突变的情况下进行仿真对比实验,仿真时长设置为4 s,在1.5 s时,参考有功功率值由初始值5 kW突增到10 kW,在3 s时又突然从10 kW降低到5 kW。

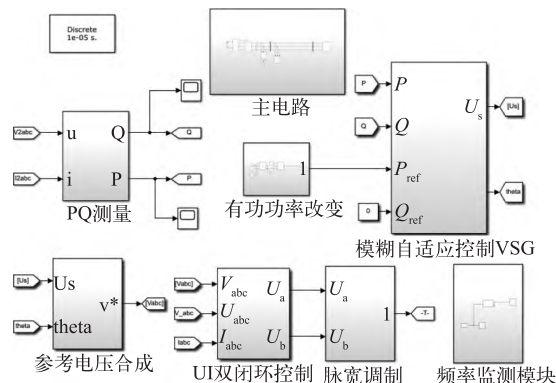


图 6 基于模糊控制的 VSG 逆变器并网仿真模型

Fig. 6 Simulation model of VSG inverter grid connection based on fuzzy control

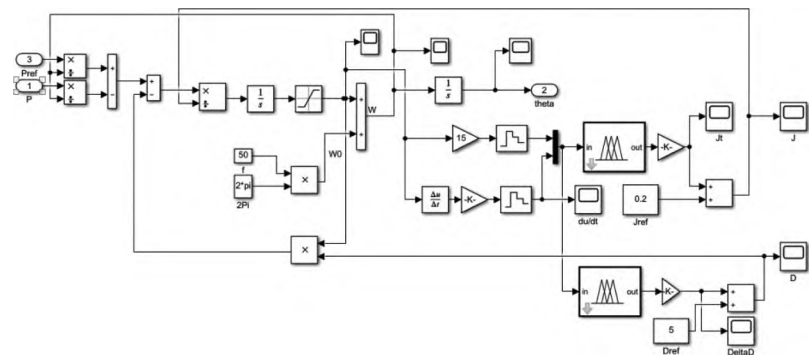


图 7 有功环中的模糊控制器仿真模型
Fig. 7 Simulation model of fuzzy controller in active power loop

表 4 模型仿真参数表

Tab. 4 Model simulation parameter table

参数	值
直流侧电压 U_{dc}/V	1 200
交流电压 U_n/V	311
滤波电阻 R_f/Ω	0.2
滤波电感 L_f/mH	5
滤波电容 $C_f/\mu F$	20
额定角速度 $\omega_n/rad/s$	314
惯量初始值 J_0	0.2
阻尼初始值 D_0	5

3.2 仿真结果分析

将固定参数VSG、仅J模糊自适应和J、D双参数模糊自适应三种控制方式进行了对比实验，得到有功功率对比仿真结果如图8所示。在系统初始达到有功给定值的阶段，采用双参数模糊自适应控制方法，对有功功率的控制可达到几乎没有超调的效果，曲线平滑，并且使给定参考功率的时间最短。在给定有功功率参考值突增或者突减时，J和D模糊自适应控制方法对有功功率的波动限制有显著效果，并且恢复到正常值的时间也最短，比其他两种方法快约0.2 s。

频率支撑对比仿真结果如图9所示，角速度对比仿真结果如图10所示。在系统达到有功设定的初始阶段，系统频率的振荡相比其他两种方法较小，并且在0.3 s左右达到了额定频率50 Hz。在给定有功功率参考值突增或者突减时，J、D模糊自适应控制方法在频率支撑上具有显著的优越性，不仅可有效限制频率波动，而且在扰动后频率恢复到额定值的时间也较短，相比其他两种

方法快0.3 s左右。在抑制角速度变化的过程中，双参数模糊控制方法的控制效果也很理想，不论是超调量还是调节时间均优于其他两种方法。

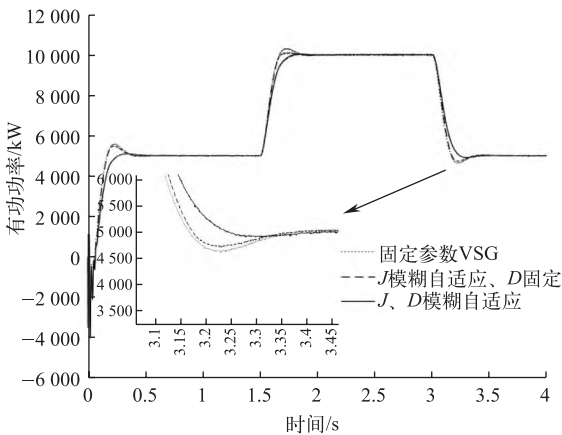


图 8 VSG 输出有功功率
Fig. 8 output active power of VSG

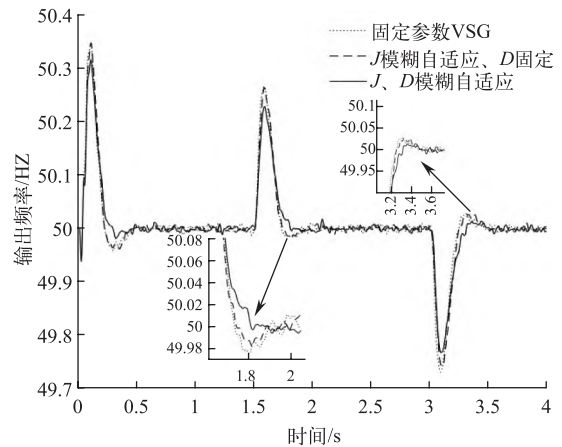


图 9 VSG 输出频率
Fig. 9 output frequency of VSG

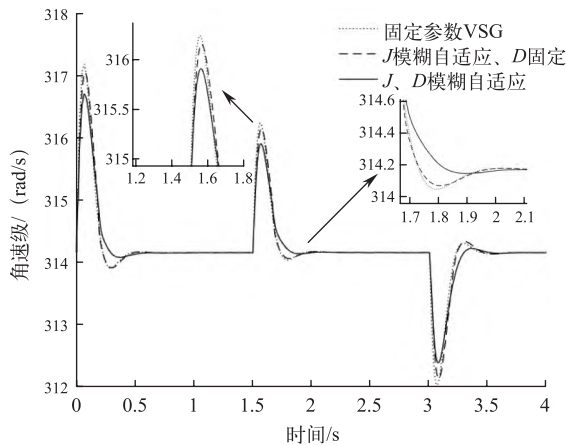


图 10 VSG 角速度波形图

Fig. 10 Angular velocity waveform of VSG

4 结束语

将参数模糊自适应控制方法引入到VSG的有功控制环节中,实现转动惯量和阻尼系数的自适应调节。进行的对比仿真实验表明在惯量和阻尼参数模糊自适应控制下,可有效降低系统在受到干扰时的有功功率波动,减小了系统波动后恢复到稳定状态下的时间,同时对系统频率有更好的支撑,优化了系统的动态性能,可进一步解决新能源发电系统在并网时存在的惯量低、阻尼弱等问题。

参考文献

- [1] 邵一阳,刘铠诚,董树锋. 并网模式下虚拟同步发电机的虚拟惯量控制策略[J/OL]. 现代电力: 1-11[2022-02-23].
- [2] 何伟,熊俊杰,赵伟哲,等. 一种虚拟同步发电机的附加阻尼控制策略研究[J]. 电气传动, 2022, 52(2): 18-24.
- [3] 王思宇,蒋林. 基于模糊的虚拟同步发电机惯量阻尼自适应控制策略[J]. 电动工具, 2021(1): 1-4, 15.
- [4] 董存,陶以彬,张牟发,等. 基于虚拟同步发电机的逆变器类电源频率特性及重塑技术[J]. 电力建设, 2022, 43(2): 109-116.
- [5] 孙宇新,王鹏,施凯,等. 基于虚拟同步发电机的惯量和阻尼自适应控制[J]. 电气传动, 2021, 51(21): 35-40.
- [6] 李玲玲,冯欢. 可再生能源电力系统的虚拟同步发电机频率控制策略[J]. 天津工业大学学报, 2021, 40(5): 81-88.
- [7] 耿昊翔,王维俊,唐帅,等. 基于无锁相环的虚拟同步发电机离并网切换控制策略研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(9): 90-95.
- [8] 李美依,黄文焘,邵能灵,等. 频率扰动下虚拟同步电机控制型分布式电源自适应惯性控制策略[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1525-1533.
- [9] 邢通,曹荣敏,候忠生,等. 孤岛模式下VSG的转动惯量无模型自适应控制[J]. 控制工程, 2022, 29(1): 152-157.
- [10] HU Y, WEI W, PENG Y, et al. Fuzzy virtual inertia control for virtual synchronous generator[C]//2016 35th Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2016: 8523-8527.
- [11] LIN Shizhi, LIN Lei, WEN Buying, et al. A voltage control strategy of VSG based on self-adaptive inertia coefficient and droop coefficient[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021.
- [12] 高飞翔,钱凯,李敏敏,等. 基于自适应阻尼算法的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(5): 109-114.
- [13] SHAO Y, ZHU C, DONG S, et al. Adaptive damping coefficient control of virtual synchronous generator of microgrid inverter[C]//2019 29th Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC). IEEE, 2019: 1-6.

作者简介

刘子阳(1998—),男,硕士研究生,研究方向为新能源发电及并网控制。

(收稿日期: 2022-04-04)