

文章编号:1671-6833(2024)03-0127-07

基于 VSG 下垂优化控制的新能源电力系统惯性提升

王明东¹, 杨岍迪¹, 李龙好², 李忠文¹

(1. 郑州大学 电气与信息工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 针对传统 VSG 技术动态性能较差且重要参数 J 和 D 最优值较难确定的问题, 提出了一种基于下垂控制与神经网络预测的 VSG 控制与参数优化策略, 实现了 VSG 技术中关键参数 J 和 D 的动态调节。首先, 所提策略将有功功率-频率下垂控制应用于 VSG 的控制算法中; 其次, 通过模拟同步发电机转子运动方程和电压与无功控制特性, 建立 VSG 的小信号分析模型, 完成了关键参数转动惯量与阻尼系数的初值整定; 最后, 建立了人工神经网络进行分析学习和网络训练, 调整权值以改变 VSG 转动惯量与阻尼系数, 通过误差函数比较输出量与输入量之间的误差, 多次学习训练后参数达到期望值。将神经网络优化算法与下垂控制策略结合, 对 VSG 控制策略进行优化。分别采用传统 VSG 控制、恒定参数下垂控制和基于神经网络优化的自适应参数下垂控制对算例进行仿真, 结果表明: 所提基于神经网络优化的自适应参数下垂控制比传统 VSG 控制的频率最大变化量降低了 26.7%, 频率稳定时间降低了 0.25 s, 表明了所提策略的有效性。

关键词: 新能源电力系统; VSG; 下垂控制; 神经网络; 小信号分析模型

中图分类号: TM712; TP13

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2024.03.005

随着越来越多的可再生式新能源发电机组接入电网, 传统发电机组在电网中的比例下降, 电网的惯量明显下降。新能源发电机组主要是通过电力电子设备将能量传送到电网, 与电网系统完全解耦, 无法响应电网的频率变化^[1-2]。此情况以光伏发电最为明显。因为光伏发电运行过程中没有旋转运动, 无法提供任何惯量^[3]。对于风力发电, 虽然机组通过叶片旋转获得能量, 理论上具有较高的惯量^[4], 但由于风机转速变化较大, 且一般通过换流器与电网弱耦合连接, 故可提供的惯量也较少^[5]。

为解决该问题, 国内外学者进行了大量研究^[6-8]。研究的核心思路为如何能够让新能源机组模拟传统大惯量同步发电机的外部特性, 使新能源电力系统获得较大的转动惯量和阻尼, 达到惯性增强、频率稳定的目的。有学者提出引入下垂控制, 即通过 P/f 下垂控制稳定电网频率运行状态^[9-11]。虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)技术是增强系统惯性的的重要手段, 最早在欧洲 VSYNC 工程提出^[12]。该技术通过模拟传统同步发电机的

特性, 使逆变器获得虚拟惯量和虚拟阻尼, 实现了风电机组和光伏电池的惯量响应^[13-15]。Alipoor 等^[16]提出了一种基于粒子群优化算法寻找合适参数的方式, 将发电机电压角偏差抑制在可控范围内, 避免系统振荡, 但此方法缺乏动态调节性能。张亚楠等^[17]提出一种自适应控制策略, 实现了控制策略的自适应调节, 但该方法仅在 3 种模式下进行修正, 并未真正实现实时调整参数。Molina-García 等^[18]提出一种无须通信的分布式需求响应控制策略, 通过响应系统各区域频率偏差及持续时间, 利用简单控制装置调节该地区部分负载辅助系统而进行调频。李俊等^[19]提出一种基于模糊控制的参数补偿策略, 但该方法仅针对风力发电机运行进行分析。

在上述研究的基础上, 提出了一种基于同步发电机下垂优化控制的 VSG 控制策略。该策略将传统同步发电机的 P/f 下垂控制引入 VSG 控制, 在电网运行过程中通过人工神经网络对频率变化进行预测, 从而达到自适应调整 VSG 的虚拟转动惯量和阻尼, 有效提高了系统面对扰动时的频率

收稿日期: 2023-10-07; 修订日期: 2023-11-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62273312); 河南省自然科学基金资助项目(212300410406)

作者简介: 王明东(1971—), 男, 河南台前人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事新型电力系统分析与控制方面的研究, E-mail: wangmingdong@zzu.edu.cn。

引用本文: 王明东, 杨岍迪, 李龙好, 等. 基于 VSG 下垂优化控制的新能源电力系统惯性提升[J]. 郑州大学学报(工学版), 2024, 45(3): 127-133. (WANG M D, YANG A D, LI L H, et al. Inertia lifting of new energy power system based on VSG droop optimal control[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2024, 45(3): 127-133.)

和功率稳定能力。算例仿真结果验证了所提策略在电网遇到故障时降低频率扰动和加速频率恢复的有效性。

1 VSG 的结构和控制算法

1.1 VSG 结构

VSG 通过对同步发电机的电磁特性和机械转

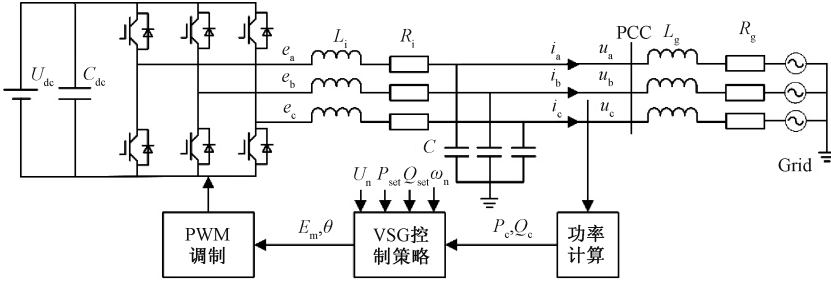


图 1 虚拟同步发电机拓扑结构

Figure 1 Topology of virtual synchronous generator

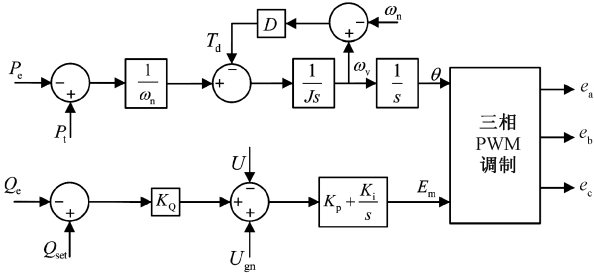


图 2 VSG 控制算法

Figure 2 VSG control algorithm

VSG 的转子机械运动数学方程为

$$J \frac{d\omega_v}{dt} = \frac{P_t - P_c}{\omega_n} - D(\omega_v - \omega_n); \quad (1)$$

$$\theta = \int \omega_v dt. \quad (2)$$

式中: J 为虚拟转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; ω_v 为虚拟角频率, rad/s ; P_c 为电磁功率, kW ; P_t 为机械功率, kW ; ω_n 为额定角频率, rad/s ; θ 为虚拟相位角; D 为虚拟阻尼, $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$ 。

同步发电机的机端电压和输出无功功率可通过同步发电机的励磁确定。同样,可以通过控制发电机的机端电势 E_m 来控制机端电压和输出无功。VSG 的虚拟机端电势 E_m 可由两部分组成:一部分为对应无功功率调节的部分,可表示为 $K_Q(Q_{\text{set}} - Q_c)$;另一部分对应机端电压差值,表示为 $U_{\text{gn}} - U$ 。根据以上分析可列出无功功率-电压控制回路数学方程:

$$E_m = [K_Q(Q_{\text{set}} - Q_c) + U_{\text{gn}} - U] \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right). \quad (3)$$

式中: E_m 为 VSG 的基本电势, V ; K_Q 为无功-电压下垂控制系数; Q_{set} 为无功功率参考值, kVar ; Q_c 为无

功特性进行分析,采用控制算法模拟发电机输出特性,实现并网逆变器模拟同步发电机的目的,其拓扑结构如图 1 所示。

1.2 VSG 基本控制算法

VSG 的核心为控制算法,以此获得虚拟转动惯量和虚拟阻尼。图 2 为 VSG 基本控制算法框图,实现了对转子运动方程和无功-电压特性的模拟。

功率, kVar ; U_{gn} 为电网侧额定电压, V ; U 为输出电压, V ; K_p 和 K_i 分别为比例系数和积分系数。

应用 θ 和 E_m 可以将 VSG 输出三相电压表示为

$$\begin{cases} e_a = \sqrt{2} E_m \cos \theta; \\ e_b = \sqrt{2} E_m \cos(\theta - 2\pi/3); \\ e_c = \sqrt{2} E_m \cos(\theta + 2\pi/3). \end{cases} \quad (4)$$

1.3 下垂控制策略

除了前述 VSG 的转子运动方程模拟特性,也可在 VSG 的有功控制回路前加上有功-频率(P/f)下垂回路。 P/f 下垂控制方程为

$$P_t - P_{\text{set}} = K_W(f_{\text{ref}} - f). \quad (5)$$

式中: K_W 为 P/f 下垂控制系数。

P/f 下垂控制如图 3 所示。

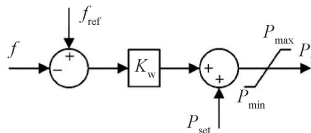


图 3 P/f 下垂控制

Figure 3 P/f droop control

传统下垂控制策略能够有效解决微网中因线路阻抗不同而引起的功率分配不均问题,将其应用于虚拟同步发电机控制时,虽然无法提供转动惯量和阻尼,但是可以有效控制系统的电压和频率稳定^[20]。采用 P/f 下垂控制对电网频率稳定性进行优化,可提升 VSG 面对扰动的抵抗能力。

2 VSG 小信号模型

VSG 的等效电路^[21]如图 4 所示。图 4 中, E 为 VSG 基波电压相量, U 为 VSG 并网处电压相量, Z

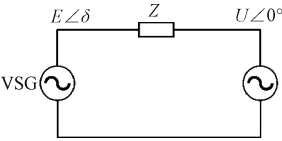


Figure 4 VSG equivalent grid-connected circuit

为 VSG 输出阻抗。

$$Z = R_i + j\omega L_i \approx j\omega L_i = jX. \quad (6)$$

功角 δ 为两个电压相量之间的相位差：

$$\delta = \int (\omega - \omega_g) dt. \quad (7)$$

式中： ω_g 为电网额定角频率。

由此得到 VSG 的输出视在功率为

$$S = 3UI^* = 3U \frac{E \angle (-\delta) - U}{jX} = P_e + jQ_e. \quad (8)$$

由式(8)可得

$$\begin{cases} P_e = \frac{3UE}{X} \sin \delta; \\ Q_e = \frac{3UE}{X} \cos \delta - \frac{3U^2}{X}. \end{cases} \quad (9)$$

电网未发生扰动时,VSG 输出电压和频率均为额定值。此时 VSG 功率稳定运行点为 (P_{e0}, Q_{e0}) , 结合式(9)可得 VSG 内电势稳定运行点：

$$\begin{cases} \delta_0 = \arctan \frac{P_{e0}X}{Q_{e0}X + 3U_n^2}; \\ E_0 = \frac{P_{e0}X}{3U_n \sin \delta_0}. \end{cases} \quad (10)$$

由式(1)~(3)、(5)、(9),将 VSG 虚拟内电势稳定运行点代入并进行拉普拉斯变换,可得 VSG 的小信号分析模型：

$$\begin{cases} s\delta(s) = \omega_v(s) - \omega_n(s); \\ (Js + D)\omega_v(s) = (P_i(s) - P_e(s))/\omega_n; \\ P_i(s) = -K_w\omega_v(s); \\ P_e(s) = \frac{3U_n^2}{X}\delta(s); \\ E(s) = \frac{1}{s}[-K_Q(Q_{set}(s) - Q_e(s)) + U(s)]; \\ Q_e(s) = -\frac{3U_n}{X}U(s) + \frac{3U_n}{X}E(s). \end{cases} \quad (11)$$

式(11)对应的模型结构图如图 5 所示。由图 5 可知,VSG 动态小信号分析模型实现了频率/有功环和电压/无功环的解耦控制。

3 转动惯量 J 和阻尼系数 D 的整定及优化

3.1 J 和 D 的参数整定

根据图 5,结合电力系统小信号分析方法,可得

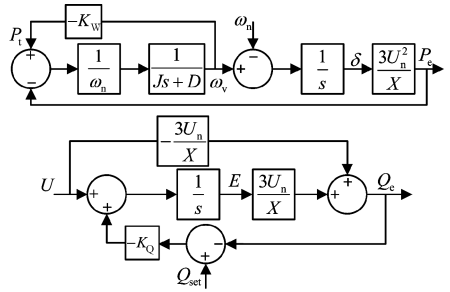


图 5 VSG 小信号分析模型

Figure 5 VSG small signal analysis model

到 VSG 的输入输出传递函数：

$$G(s) = \frac{P_e(s)}{P_i(s)} = \frac{\frac{3U_n^2}{J\omega_n X}}{s^2 + \frac{Ds}{J} + \frac{3U_n^2}{J\omega_n X}}. \quad (12)$$

在已知阻抗 X 和电网电压 U_n 的情况下,由式(12)可得到该二阶模型的自然震荡角频率和阻尼系数：

$$\begin{cases} \omega_{np} = \sqrt{3U_n^2/J\omega_n X}; \\ \xi = D\sqrt{\omega_n X/12JU_n^2}. \end{cases} \quad (13)$$

VSG 的阻尼可以通过整定阻尼系数 D 实现,虚拟阻尼不足时,可以增大 D 。为了保证 VSG 响应电网频率变化时有较快的速度,并为了保障稳定性,取有功环为欠阻尼环节,即 $0.707 < \xi < 1$,此时该二阶系统的超调量和调节时间分别为

$$\begin{cases} \sigma = e^{-\pi\xi/\sqrt{1-\xi^2}} \times 100\%; \\ t_s = \frac{3.5}{\xi\omega_{np}} = \frac{3.5}{D}. \end{cases} \quad (14)$$

从式(14)可以看出,该二阶系统的超调量和调节时间由虚拟转动惯量 J 和虚拟阻尼 D 决定。当 J 不变时, D 越大,超调量越小;当 D 不变时, J 越小,超调量越小。 J 越大, D 越小,则调节时间越大,将延缓电力系统的稳定恢复时间。

根据式(1)可得

$$\frac{d\omega_v}{dt} = \frac{(P_i - P_e)}{\omega_n} - D(\omega_v - \omega_n). \quad (15)$$

由式(15)看出, J 和频率变化率成反比关系, J 越大, $d\omega_v/dt$ 越小,在电网扰动初期, J 的增加可以有效抑制频率的迅速变化。

为了使 VSG 的频率响应与机组一次调频过程配合,调节时间应满足 $t_s < 3$ s。令 $t_s < 0.2$ s,由式(14)可得 $\omega_{np} > 24.8$ rad/s,取 $\omega_{np} = 24.8$ rad/s。

由式(13)及 $0.707 < \zeta < 1$ 可得 $J = 0.85$, D 的取值为

$$\sqrt{\frac{6JU_n^2}{\omega_n}} < D < 2\sqrt{\frac{3JU_n^2}{\omega_n}}. \quad (16)$$

计算得 $18.9 < D < 27.2$ 。

3.2 J 和 D 的神经网络优化

当电力系统处于稳定运行状态时, VSG 的 J 和 D 参数可按上述方法整定为恒定值。但在实际运行中, 当电网的频率和电压发生变化时, 恒定的 J 和 D 并不能很好地响应电力系统的变化。针对此情况, 本文根据电网频率变化率和最大偏移量, 构建神经网络算法预测 J 和 D 的变化量, 即对 J 和 D 进行优化。

选取一个经典的频率振荡衰减过程进行分析。如图 6 所示, 将该振荡过程分为 4 个阶段。在阶段 I ($t_1 \sim t_2$), 角速度迅速增大, 角速度变化率 $d\omega/dt$ 从 0 迅速增加再缓慢减小。此时应增大 J 和 D , 以抑制角速度的超调量和变化率; 在阶段 II ($t_2 \sim t_3$) 内, VSG 角速度减小, 变化率从 0 迅速减小再缓慢增大, 此阶段应使用较小的转动惯量 J , 加快频率恢复速度。阶段 III ($t_3 \sim t_4$)、阶段 IV ($t_4 \sim t_5$) 类似。

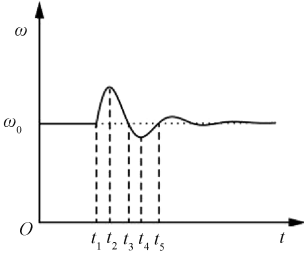


图 6 电网的频率振荡

Figure 6 Frequency oscillation of the power grid

分析可知, J 与频率变化率的大小和频率变化量有关, 而 D 仅与频率变化量有关。根据上述选取原则以及 J 和 D 与频率变化率和变化量之间的关系, 提出如下自适应控制策略:

$$J = \begin{cases} J_0, \Delta\omega(d\omega/dt) \leq 0; \\ J_0, |d\omega/dt| \leq 0; \\ J_0 + K_J |d\omega/dt|, \Delta\omega(d\omega/dt) > 0 \cap |d\omega/dt| > T_J. \end{cases} \quad (17)$$

$$D = \begin{cases} D_0, |\Delta\omega| \leq T_D; \\ D_0 + K_D |\Delta\omega|, |\Delta\omega| > T_D. \end{cases} \quad (18)$$

式中: J_0 和 D_0 分别为 VSG 正常运行时的虚拟转动惯量和虚拟阻尼; K_J 和 K_D 分别为虚拟转动惯量和虚拟阻尼的调节系数; T_J 和 T_D 分别为虚拟转动惯量和虚拟阻尼的调节阈值。

本文通过建立人工神经网络实现 J 和 D 的自适应调节^[22]。构造简单神经元网络模型如图 7 所示。图 7 中, x_1, x_2 为神经元的输入信号, w_1, w_2 表示输入

信号的权重值, 通过训练算法实时改变权重值, 使得该神经网络的预测效果达到最佳。该神经元的输出 $z = g(x_1, x_2)$, 其中 z 为一个关于 x_1, x_2 的非线性函数。定义以下神经网络参数: 输入向量 $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$; 输出层输出向量 $\mathbf{y}_o = (y_1, y_2)$; 期望输出向量 $\mathbf{d}_o = (d_1, d_2)$; 误差函数 $E = \frac{1}{2} \sum_{o=1}^2 (d_o(k) - y_o(k))^2$ 。

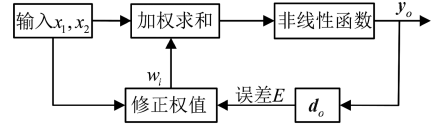


图 7 单个神经网络

Figure 7 Individual neuron network

由此可以获得权值的改变量 $\Delta w_i(k)$:

$$\Delta w_i(k) = -\mu \frac{\partial e}{\partial w_i} = -\mu \frac{\partial e}{\partial y_o} \frac{\partial y_o}{\partial w_i} = \mu \delta_o(k) \cdot x_i(k). \quad (19)$$

其中 μ 为学习率。最后得到的权值为

$$w_i^{N+1} = w_i^N + \mu \delta_o(k) \cdot x_i(k), i = 1, 2. \quad (20)$$

计算全局误差:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{o=1}^2 (d_o(k) - y_o(k))^2. \quad (21)$$

对于 VSG 系统, 选取 $|\Delta\omega|$ 和 $d\omega/dt$ 作为神经网络的输入, K_J 和 K_D 为权重, 期望输出向量的值为 $d_1 = \omega = 314 \text{ rad/s}$, $d_2 = P = P_{\text{set}}$ 。将输入 x_1, x_2 代入式(19), 计算得出权值的修正量, 进而得到最新的权值 K_J 和 K_D 。使用该权值代入式(17)、(18)计算得出新的 J 和 D , 此时的 VSG 频率和电压为神经网络输出。将 $\omega = 314 \text{ rad/s}$, $P = P_{\text{set}}$ 代入期望输出向量, 代入式(21)与输出进行误差计算, 当误差满足可接受的条件时, 结束算法, 接受最新的权重 w_1, w_2 , 即 K_J 和 K_D 。本文选取当误差函数满足 $E \leq 0.1$ 时, 停止训练, 否则选取下一组样本进行学习。神经网络优化参数流程图如图 8 所示。

4 算例仿真

对单 VSG 并入无穷大电网情况进行仿真, 系统参数如表 1 所示。

仿真时长设置为 2 s, 无功功率参考值为 2 000 Var, 负荷有功功率额定值为 12 kW。0 s 时 VSG 有功功率参考值为 12 kW, 0.4 s 突变, 参考值变为 15 kW, 在 1.1 s 时有功率第 2 次发生变化, 降为 10 kW。有功功率变化参考值如图 9 所示。

建立神经网络模型, 对 VSG 虚拟惯量和虚拟阻尼进行预测的结果如图 10 所示。

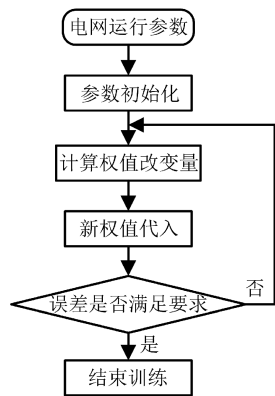


图 8 神经网络控制流程图

Figure 8 Neural network control flow chart

表 1 仿真系统参数设置

Table 1 Simulation parameter setting			
参数	取值	参数	取值
U_{dc}/V	800	$J_0/(kg\cdot m^2)$	0.8
R_i/Ω	0.01	$D_0/(N\cdot m\cdot s\cdot rad^{-1})$	20
L_i/mH	2	T_j	12
$C/\mu F$	10	T_D	0.015
U_{gn}/V	220	K_j	0.04
K_w	15 000	K_D	300
K_Q	0.000 1		

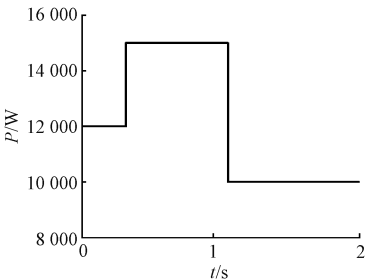


图 9 有功功率参考值变化

Figure 9 Active power reference value variation

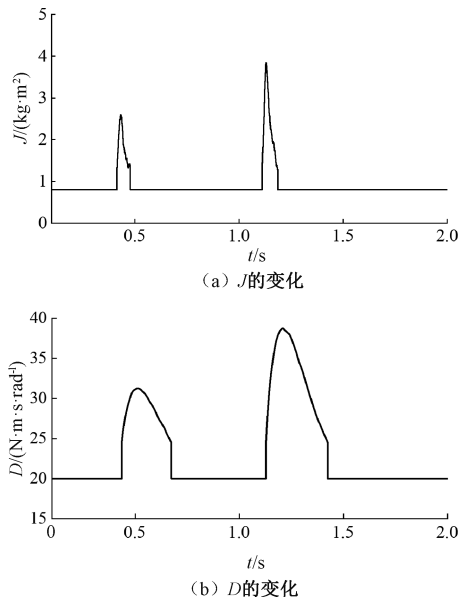


图 10 VSG 虚拟惯量 J 和虚拟阻尼 D

Figure 10 VSG virtual inertia J and virtual damping D

由图 10 可知,基于神经网络模型预测,可以在频率发生大的扰动时对 K_j 和 K_D 进行调整,通过自适应算法改变 J 和 D 的数值,以达到实时响应频率变化的目的。

图 11 为 VSG 在有功功率参考值突然变化时,分别采用传统 VSG 控制、恒定参数下垂控制和基于神经网络优化的自适应参数下垂控制的频率变化曲线。可以看到,传统 VSG 控制策略在响应系统的频率变化时较不稳定,在有功功率参考值突然增大时,系统频率增大;在 3 种控制方式下,频率分别在 0.53、0.51、0.49 s 达到最高点,频率最高点分别为 50.045、50.037、50.033 Hz,并分别在 1.1、1.08、0.95 s 恢复到正常水平。这表明基于神经网络优化的自适应参数下垂控制策略能够很好地抑制频率的大幅度摆动,在频率超调量过大时,神经网络根据变化量对参数 K_j 和 K_D 进行预测,迅速提升 J 和 D ,降低频率变化速度和频率超调量。在频率恢复过程中,为加快调节速度,根据上述分析,优化 K_D 参数,减小虚拟惯量,以在频率偏移较大时迅速将频率稳定到正常水平。

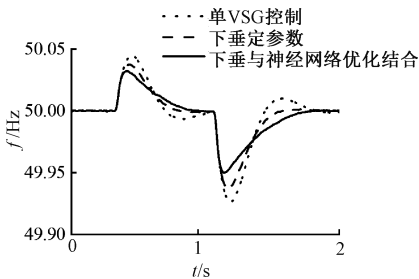


图 11 VSG 并网输出频率变化

Figure 11 VSG grid-connected output frequency variation

图 12 为不同控制策略下的系统有功功率响应曲线,3 种控制方法的调节时间分别为 0.7、0.7、0.45 s。可以看出,当给定参考功率增大时,传统 VSG 控制对于超调量的抑制不够明显;恒定参数下垂控制对于有功的超调量有所抑制,但调节时间较长;采用自适应参数下垂控制策略时,有功的超调量和调节时间都显著降低。

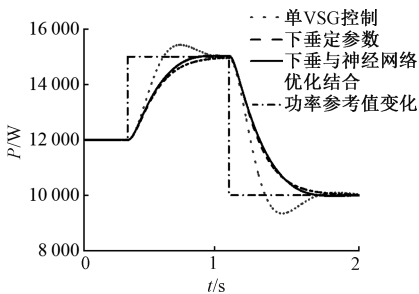


图 12 VSG 并网输出功率变化

Figure 12 VSG grid-connected output power variation

5 结论

本文研究 VSG 的下垂控制,以提升逆变器面对扰动的抵抗能力,加速频率和功率的恢复,得到以下结论。

(1)建立了 VSG 的控制模型。模型包括转子运动方程、 P/f 下垂控制模型与无功电压特性方程,可实现对电网频率的稳定控制。

(2)建立了 VSG 的小信号分析模型,实现了频率/有功环和电压/无功环的解耦。

(3)为适应系统的时变工况,对 VSG 的关键参数虚拟惯量 J 和虚拟阻尼 D 进行整定。设计了人工神经网络,分析电网运行状态,对电网的频率、电压变化进行分析预测,对预测值进行分析以后调整权重值,得出 J 和 D 的变化量 ΔJ 和 ΔD 。

(4)将神经网络优化算法与下垂控制策略结合,对 VSG 控制策略进行优化。分别采用传统 VSG 控制、恒定参数下垂控制和基于神经网络优化的自适应参数下垂控制对算例进行仿真,结果表明,所提的优化控制策略可以达到提升新能源电力系统惯性的目的。

参考文献:

[1] 鲁宗相, 汤海雁, 乔颖, 等. 电力电子接口对电力系统频率控制的影响综述[J]. 中国电力, 2018, 51(1): 51-58.

LU Z X, TANG H Y, QIAO Y, et al. The impact of power electronics interfaces on power system frequency control: a review[J]. Electric Power, 2018, 51(1): 51-58.

[2] 李雪, 宋彦龙. 蓄电池储能运行控制对有源配电网影响研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2019, 40(5): 32-38, 51.

LI X, SONG Y L. Study on the influence of battery energy storage operation control on active distribution network[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2019, 40(5): 32-38, 51.

[3] SONI N, DOOLLA S, CHANDORKAR M C. Improvement of transient response in microgrids using virtual inertia[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1830-1838.

[4] ATTYAABT, HARTKOPF T. Control and quantification of kinetic energy released by wind farms during power system frequency drops[J]. IET Renewable Power Generation, 2013, 7(3): 210-224.

[5] 李少林, 秦世耀, 王瑞明, 等. 大容量双馈风电机组虚拟惯量调频技术[J]. 电力自动化设备, 2018, 38

(4): 145-150, 156.

LI S L, QIN S Y, WANG R M, et al. Control strategy of virtual inertia frequency regulation for large capacity DFIG-based wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 145-150, 156.

[6] 曾正, 赵荣祥, 汤胜清, 等. 可再生能源分散接入用先进并网逆变器研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24): 1-12, 21.

ZENG Z, ZHAO R X, TANG S Q, et al. An overview on advanced grid-connected inverters used for decentralized renewable energy resources [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24): 1-12, 21.

[7] KE Z P, DAI Y X, PENG Z S, et al. VSG control strategy incorporating voltage inertia and virtual impedance for microgrids[J]. Energies, 2020, 13(16): 4263.

[8] RASOOL A, YAN X W, RASOOL H, et al. VSG stability and coordination enhancement under emergency condition[J]. Electronics, 2018, 7(9): 202.

[9] HUL L, FU L. Primary frequency modulation of microgrid based on consistent droop control method[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2387(1): 012017.

[10] 罗兰, 王渝红, 陈诗昱, 等. 基于虚拟同步发电机控制策略的多端柔性直流系统自适应下垂控制[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(17): 7116-7121.

LUO L, WANG Y H, CHEN S Y, et al. Adaptive droop control of multi-terminal direct current based on virtual synchronous generator control strategy[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(17): 7116-7121.

[11] 孙孝峰, 王娟, 田艳军, 等. 基于自调节下垂系数的 DG 逆变器控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 71-78, 11.

SUN X F, WANG J, TIAN Y J, et al. Control of DG connected inverters based on self-adaptable adjustment of droop coefficient[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 71-78, 11.

[12] TORRES M, LOPES L A C. Virtual synchronous generator control in autonomous wind-diesel power systems[C]//2009 IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC). Piscataway:IEEE, 2009: 1-6.

[13] KERDPHOL T, RAHMAN F S, WATANABE M, et al. Small-signal analysis of multiple virtual synchronous machines to enhance frequency stability of grid-connected high renewables [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2021, 15(8): 1273-1289.

[14] CHENY, HESSE R, TURSCHNER D, et al. Improving the grid power quality using virtual synchronous machines [C]//2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. Piscataway: IEEE, 2011: 1-6.

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

[16] 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.

[17] 张亚楠, 朱森, 张健文, 等. 基于自适应调节的微源逆变器虚拟同步发电机控制策略[J]. 电源学报, 2016, 14(3): 11–19.

ZHANG Y N, ZHU M, ZHANG J W, et al. Control strategy of virtual synchronous generator based on adaptive adjusting for distributed inverters[J]. Journal of Power Supply, 2016, 14(3): 11–19.

[18] MOLINA-GARCÍA A, BOUFFARD F, KIRSCHEND S. Decentralized demand-side contribution to primary frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 411–419.

[19] 李俊, 任冲, 樊国旗, 等. 基于模糊控制的高占比风电系统自适应虚拟惯量及调频参数补偿策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(4): 55–61.

LI J, REN C, FAN G Q, et al. Study on adaptive virtual inertia and frequency modulation parameter compensation strategy of high proportion wind power system based on fuzzy control[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(4): 55–61.

[20] WANG W Y, JIANG L, CAO Y J, et al. A parameter alternating VSG controller of VSC-MTDC systems for low frequency oscillation damping[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4609–4621.

[21] 胡文强, 吴在军, 孙充勃, 等. 基于 VSG 的储能系统并网逆变器建模与参数整定方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(8): 13–23.

HU W Q, WU Z J, SUN C B, et al. Modeling and parameter setting method for grid-connected inverter of energy storage system based on VSG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 13–23.

[22] 丁小彬, 谢宇轩, 薛皓文, 等. 基于神经网络算法的滚刀磨损量预测方法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(1): 83–88, 95.

DING X B, XIE Y X, XUE H W, et al. A method for disc cutter wear prediction based on neural network[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(1): 83–88, 95.

Inertia Lifting of New Energy Power System Based on VSG Droop Optimal Control

WANG Mingdong¹, YANG Aodi¹, LI Longhao², LI Zhongwen¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: Aiming at the problems of poor dynamic performance of traditional VSG technology and difficulty to determine the optimal values of important parameters J and D , a VSG control and parameter optimization strategy based on droop control and neural network prediction was proposed to realize dynamic adjustment of key parameters J and D in VSG technology. The proposed strategy applied the active power-frequency droop control to the control algorithm of VSG. Then, simulated the rotor motion equation and the voltage and reactive power control characteristics of synchronous generator, the small signal analysis model of VSG was established, and the initial setting of key parameters rotational inertia and damping coefficient were completed. Finally, an artificial neural network was established for analysis learning and network training, and the weight was adjusted to change the VSG moment of inertia and damping coefficient. The error between the output and the input was compared by the error function, and the parameter reached the expected value after multiple learning and training. The neural network optimization algorithm was combined with the droop control strategy to optimize the VSG control strategy. Traditional VSG control, constant parameter droop control and adaptive parameter droop control based on neural network optimization were used to simulate a numerical example, and the results showed that, compared with traditional VSG control, the proposed adaptive parameter droop control based on neural network optimization reduced the maximum frequency variation by 26.7%, and the frequency stabilization time by 0.25 s. The strategy was effective.

Keywords: new energy power system; VSG; droop control; neural network; small signal analysis model