

# 虚拟同步发电机暂态频率建模及特性分析

彭飞<sup>1</sup>, 田旭<sup>1</sup>, 刘飞<sup>2</sup>, 许德操<sup>2</sup>, 方是文<sup>3</sup>, 田旭<sup>4</sup>

- (1. 国网青海省电力公司经济技术研究院, 青海 西宁 810000;  
2. 国网青海省电力公司, 青海 西宁 810000; 3. 北京理工大学 自动化学院, 北京 100081;  
4. 中国矿业大学(北京) 机电与信息工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 大规模风电、光伏等新能源机组接入电力系统, 将极大地改变系统的电源特性, 使系统转动惯量水平下降, 威胁系统的暂态频率稳定安全。虚拟同步发电机技术能够增强新能源机组对系统的惯量支撑能力, 促进系统频率稳定。为了定量描述虚拟同步发电机的暂态特性, 增强对VSG的控制能力, 虚拟同步发电机的暂态频率建模亟需研究。基于新能源机组虚拟同步发电机控制策略, 考虑新能源机组惯性响应、一次调频等特性, 建立了虚拟同步发电机的暂态频率响应模型, 搭建了Matlab/Simulink仿真模型, 验证了所建立的解析模型的正确性。最后, 分析了不同控制参数对虚拟同步发电机暂态频率响应的影响, 明确了控制参数对虚拟同步发电机暂态频率响应的作用规律, 为控制新型电力系统频率稳定指明了方向。

**关键词:** 虚拟同步发电机; 惯性响应; 一次调频; 暂态频率

**中图分类号:** TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd24864

## Transient Frequency Modeling and Characteristic Analysis of Virtual Synchronous Generator

PENG Fei<sup>1</sup>, TIAN Xu<sup>1</sup>, LIU Fei<sup>2</sup>, XU Decao<sup>2</sup>, FANG Shiwen<sup>3</sup>, TIAN Xu<sup>4</sup>

- (1. *Economic and Technical Research Institute, State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810000, Qinghai, China*; 2. *State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810000, Qinghai, China*; 3. *School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*; 4. *School of Mechanical Electronic & Information Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** The integration of large-scale wind power, photovoltaic and other renewable energy resources for the power system will greatly change the power supply characteristics, reducing the inertia of power system and threatening the stability of transient frequency. The virtual synchronous generator (VSG) technology can improve the inertia of renewable energy to promote the stability of transient frequency. In order to quantitatively describe the characteristics of transient frequency of VSG and enhance the control ability of VSG, the transient frequency model of VSG needs to be studied urgently. Based on the VSG control strategy of renewable energy, considering the inertial response, primary frequency regulation of renewable energy, the transient frequency model of VSG was established, and a Matlab/Simulink based simulation model was built to verify the validity of the established analytical model. Finally, the influence of different control parameters on the transient frequency of VSG was analyzed, and the effect of control parameters on the transient frequency of VSG was clarified, giving the guidance for system frequency stabilization.

**Key words:** virtual synchronous generator (VSG); inertial response; primary frequency regulation; transient frequency

为实现“2030年碳达峰、2060年碳中和”战略目标,我国将构建以新能源为主体的新型电力系统。因此,以风电、光伏为代表的新能源机组将逐渐取代传统同步机组,成为新型电力系统的主

基金项目: 国网青海省电力公司经济技术研究院科研项目(45678921)

作者简介: 彭飞(1988—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为新能源并网稳定性,Email:18709718400@163.com

通讯作者: 田旭(1984—),男,博士,副教授,主要研究方向为电力系统次同步振荡、新能源发电及并网技术,Email:WindFarms@126.com

力电源,进而将重塑系统的电源结构,造成系统的惯量水平急剧下降,将极大地改变系统的暂态频率特性,由此可能会触发低频减载等控制保护装置,引发系统出现停电事故,对系统的频率安全稳定运行带来巨大挑战<sup>[1-2]</sup>。

虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)技术是一种友好的新能源机组并网控制技术,通过模拟同步发电机的转子运动方程,使新能源机组具备类似同步机的有功调频、无功调压等机电暂态特性,能够提升新型电力系统的等效惯量水平,进而增强系统的暂态频率稳定性,促进系统的安全稳定运行<sup>[3]</sup>。

建立VSG的数学模型是实现对其暂态频率特性分析与设计的基础,因此为了掌握VSG的暂态频率特性与作用规律,首先需要开展VSG的建模工作,为分析VSG的暂态频率特性奠定理论基础,从而为进一步提升对VSG暂态频率的控制提供理论依据,为维持系统频率稳定指明方向。

针对VSG的建模问题,文献[4]基于VSG原理,建立了VSG的暂态频率与储能容量之间的关系,明确了储能容量的配置方法,但未考虑VSG惯性控制的影响;文献[5-6]建立了多VSG并网运行的有功-频率响应分析模型,基于多VSG并网运行系统的节点导纳矩阵,得到了VSG暂态输出有功的影响因素,也未考虑VSG惯性控制的影响;文献[7]考虑VSG的有功-频率特性,提出了一种基于机械导纳法的转矩-频率动力学建模方法,建立了多台VSG并联运行的机械导纳模型,进而分析机组的功频特性,同样未考虑VSG惯性控制的影响;文献[8]考虑VSG控制特性,给出了一种基于机电暂态的VSG控制储能建模方法,分析了模型的功频特性,但未考虑VSG一次调频的影响;文献[9]基于VSG的二阶非线性模型,建立了VSG的线性化传递函数模型,明确了VSG等效惯量与阻尼参数之间的关系,但未考虑VSG一次调频的影响;文献[10-11]建立了VSG的工频小信号模型,并给出了一种VSG控制参数的设计方法,也未考虑VSG一次调频的影响;文献[12]考虑VSG控制参数与主电路参数的交互作用,建立了VSG暂态模型,同样未考虑VSG一次调频的影响。

综上所述,现有文献一般基于VSG控制策略,建立VSG的数学模型,但未能充分考虑VSG惯性控制、一次调频等不同响应阶段的特性,建

立VSG的暂态模型,因而也就无法完整量化描述VSG在不同响应阶段的暂态频率特性,从而无法有效制定VSG在不同暂态频率响应阶段的控制措施与参数优化设计方法。

鉴于此,本文基于VSG的控制策略,考虑VSG惯性控制、一次调频等不同有功-频率响应特性,建立VSG的暂态频率响应数学模型,得到VSG不同阶段下的暂态频率响应数学表达式;然后,搭建Matlab/Simulink仿真模型,验证VSG暂态频率响应数学模型的正确性,为定量分析VSG的暂态频率特性奠定理论基础;最后,分析VSG转动惯量、一次调频系数等控制参数对暂态频率响应的影响规律,为有效掌握VSG的暂态频率特性奠定基础,进而为VSG在不同暂态频率响应阶段下的参数优化设计提供参考依据。

## 1 以新能源为主体的新型电力系统

以新能源为主体的新型电力系统结构示意图如图1所示,由图1可知,新型电力系统主要由光伏电站、风电场站、同步发电机组、储能电站及输配电网等部分组成。其中光伏电站、风电场站等新能源场站在系统中的占比较高,是新型电力系统的主力电源<sup>[13-15]</sup>。

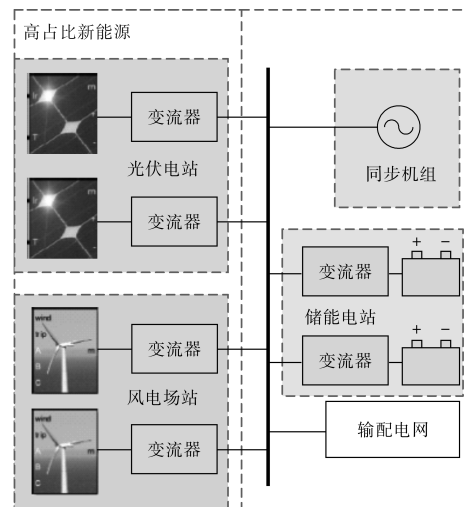


图1 以新能源为主体的新型电力系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the renewable energy dominated power system

以新能源为主体的新型电力系统频率暂态响应典型曲线如图2所示,在惯性响应阶段,系统频率快速偏离其频率额定值;在一次调频阶段,系统频率达到其极值点 $f_{\text{nair}}$ ,之后恢复至某一频率值,系统暂态频率响应存在稳态误差 $\Delta f$ 。

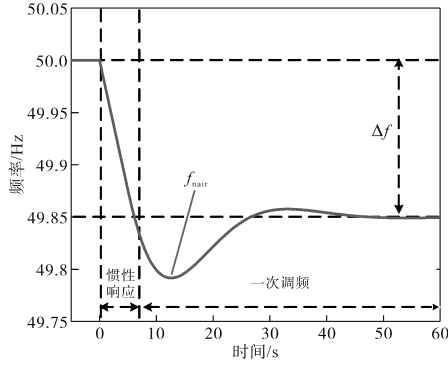


图2 新型电力系统频率暂态响应示意图

Fig.2 Frequency transient response in the renewable energy dominated power system

在新型电力系统惯性响应阶段,当系统出现有功失衡时,系统频率调节主要依靠系统同步机旋转动能、异步机旋转动能、新能源机组虚拟惯量提供的能量及储能装置等的惯性作用,减小频率变化速率。在惯性响应阶段,系统各类能量存储装置自动释放或吸收能量以响应有功失衡,依靠系统自身的惯性作用,抵抗系统运动状态的变化。

在新型电力系统一次调频阶段,机组增减有功出力,如火电机组(水电机组)通过改变阀(闸门)开口度进而改变进气(水)量,采用虚拟同步等惯性控制的新能源机组通过检测电网频率的变化而改变机组输出的电磁功率,减小系统有功失衡,降低频率变化速度,并促使频率恢复到频率额定值附近。

根据以上分析可知,系统的惯性控制、一次调频对系统的频率稳定具有重要作用。忽略惯性控制、一次调频的影响,将无法准确描述VSG在惯性响应阶段出现有功失衡时以及在一次调频响应阶段一次调频控制器的暂态频率特性,因此,本文充分考虑VSG惯性控制、一次调频控制等不同响应阶段特性,建立VSG的暂态频率响应模型,进而分析惯性控制、一次调频控制等参数对系统频率响应的影响规律。

## 2 虚拟同步发电机暂态频率建模

为提升以新能源为主体的新型电力系统的抗干扰能力,增强系统的暂态频率稳定性,风电、光伏等新能源机组一般可采用VSG控制策略。VSG通过模拟同步发电机转子机械运动方程,使风电、光伏等新能源机组具备同步发电机的有功-调频特性,增强新能源机组的惯量支撑能力,

维持系统频率暂态稳定。

### 2.1 暂态频率模型

VSG的典型控制策略如图3所示。图中, $u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}$ 为VSG并网点三相电压; $u_m$ 为VSG并网点三相电压幅值; $u_{ref}$ 为VSG并网点三相电压幅值指令值; $i_{ga}, i_{gb}, i_{gc}$ 为VSG并网点三相电流; $L_f$ 为VSG滤波电感; $L_g$ 为电网等效电感; $P_e, Q_e$ 分别为VSG并网点输出电磁有功与无功功率; $Q_{ref}$ 为VSG无功指令值; $J$ 为VSG的转动惯量; $P_m$ 为VSG输入功率; $D$ 为VSG的阻尼系数; $\omega$ 为VSG的角频率; $\theta$ 为VSG的相角; $k_u$ 为VSG电压下垂系数; $K$ 为VSG无功-电压控制环积分系数; $E$ 为VSG内电势幅值<sup>[16-19]</sup>。

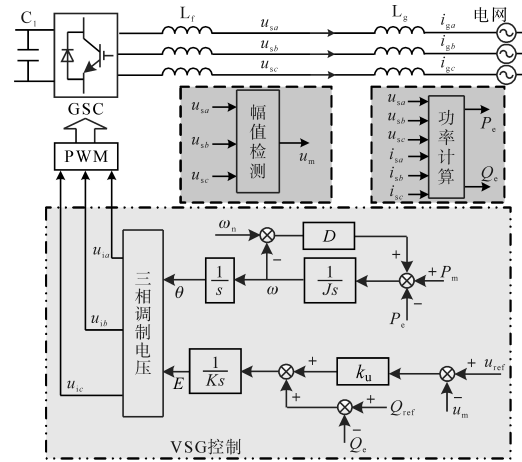


图3 VSG的典型控制框图

Fig.3 Typical control block diagram of VSG

根据图3所示的控制框图,可得VSG的有功-频率运动方程为

$$Jd\omega/dt = P_m - P_e + D(\omega_n - \omega) \quad (1)$$

式中: $\omega_n$ 为系统扰动发生前VSG的额定角频率。

当新型电力系统处于稳定运行状态时,VSG运行于稳态工作点上,VSG输出电磁功率与输入功率相等,即有

$$P_e = P_m \quad (2)$$

当新型电力系统发生负荷投入、机组切机等扰动时,系统的输入功率与电磁功率将失去平衡,系统将无法维持原先的稳定运行状态,造成系统频率偏离其额定值。

在扰动发生瞬间,系统的电磁功率发生突变,由于系统输入功率的调整具有滞后性,其输入功率无法瞬时响应电磁功率的变化,将处于扰动发生前的状态,保持不变,因而系统将进入惯性响应阶段,系统依靠同步机转子、异步机转子、VSG等设备的惯性作用抵抗系统频率的快速



变化。

## 2.2 惯性响应阶段

在惯性响应阶段,VSG电磁功率 $P_e$ 发生突变,其输入功率 $P_m$ 保持不变;在扰动发生时,不妨设VSG电磁功率突变为其输入功率的 $k$ 倍,则有

$$P_e = kP_m \quad (3)$$

将式(3)代入式(1),整理可得惯性响应阶段VSG的运动方程为

$$\frac{d\omega}{dt} + \frac{D}{J}\omega = \frac{\Delta P_m + D\omega_n}{J} \quad (4)$$

其中  $\Delta P_m = (1-k)P_m$

式中: $\Delta P_m$ 为功率变化量。

根据式(4)可求解得到惯性响应阶段角频率的表达式为

$$\omega = \frac{\Delta P_m}{D} (1 - e^{-\frac{D}{J}t}) + \omega_n \quad (5)$$

可得在惯性响应阶段VSG的角频率变化率为

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\Delta P_m}{J} e^{-\frac{D}{J}t} \quad (6)$$

由式(6)可知,在惯性响应阶段,系统频率会偏离额定频率,其频率变化速率取决于转动惯量 $J$ 、阻尼系数 $D$ 等参数。

最大频率变化率为

$$\left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{\max} = \frac{|\Delta P_m|}{J} \quad (7)$$

## 2.3 一次调频阶段

VSG可参与系统一次调频响应辅助服务,其一次调频控制框图如图4所示,图中 $k_1$ 为一次调频系数, $\Delta P_1$ 为VSG参与一次调频的输入功率变化量。考虑VSG的一次调频控制作用,可得一次调频阶段VSG的运动方程为

$$\frac{d\omega}{dt} + \frac{D}{J}\omega = \frac{\Delta P_m + D\omega_n + \Delta P_1}{J} \quad (8)$$

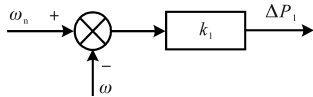


图4 VSG一次调频控制框图

Fig.4 The control block diagram of VSG primary frequency regulation

根据图4所示的控制框图,可知VSG一次调频阶段额外输入功率为

$$\Delta P_1 = k_1(\omega_n - \omega) \quad (9)$$

为避免一次调频阶段额外输入功率对VSG造成冲击,引入一阶惯性环节对输入功率进行控制,使之平缓作用于VSG。

考虑一阶惯性环节的作用,一次调频阶段额外输入功率在复频域的表达式为

$$\Delta P_1(s) = k_1 \left[ \frac{\omega_n}{s} - \omega(s) \right] \frac{1}{Ts + 1} \quad (10)$$

式中: $\omega(s)$ 为系统角频率的 $s$ 域表达式; $T$ 为一次调频控制器惯性常数。

对式(8)进行拉氏变换,并将式(10)代入运算,整理可得一次调频阶段VSG角频率在 $s$ 域的解为

$$\omega(s) = \frac{\Delta P_m + D\omega_n + k_1\omega_n}{[JTs^2 + (J + TD)s + (k_1 + D)]s} + \frac{JT\omega(T_1)s + T(\Delta P_m + D\omega_n) + J\omega(T_1)}{JTs^2 + (J + TD)s + (k_1 + D)} \quad (11)$$

式中: $T_1$ 为一次调频阶段的启动时刻; $\omega(T_1)$ 为一次调频阶段VSG角频率初始值。

一次调频阶段VSG角频率初始值也是惯性响应阶段的终值,于是根据式(5)可知一次调频阶段VSG角频率的初始值为

$$\omega(T_1) = \frac{\Delta P_m}{D} (1 - e^{-\frac{DT_1}{J}}) + \omega_n \quad (12)$$

将式(11)做拉氏反变换,可得其时域表达式为

$$\omega = \frac{\Delta P_m + (D + k_1)\omega_n}{D + k_1} + k_2 \left[ k_3 \cosh(t) - \frac{k_4 \sinh(k_3 t)}{k_3} \right] e^{-\frac{(J+DT)t}{2JT}} \quad (13)$$

其中

$$\left\{ \begin{aligned} k_2 &= \frac{D\omega(T_1) - \Delta P_m - D\omega_n - k_1\omega_n + k_1\omega(T_1)}{D + k_1} \\ k_3 &= \sqrt{\frac{D^2}{4J^2} - \frac{D}{2JT} + \frac{1}{4T^2} - \frac{k_1}{JT}} \\ k_4 &= \frac{\Delta P_m + D\omega_n - D\omega(T_1) + k_1\omega_n - k_1\omega(T_1)}{D[D\omega(T_1) - \Delta P_m - D\omega_n - k_1\omega_n + k_1\omega(T_1)]} + \frac{-Tk_1\Delta P_m}{2DH[D\omega(T_1) - \Delta P_m - D\omega_n - k_1\omega_n + k_1\omega(T_1)]} + \frac{J + DT}{2DJ} \end{aligned} \right. \quad (14)$$

由式(13)可知,一次调频完成后,VSG角频率稳态值与角频率额定值的差为

$$\Delta\omega = \lim_{t \rightarrow \infty} (\omega - \omega_n) = \Delta P_m / (D + k_1) \quad (15)$$

由式(15)可知,VSG完成一次调频后,系统频率存在稳态误差。

### 2.4 暂态频率响应

根据上述分析,可知VSG惯性响应、一次调频的角频率暂态响应解析表达式为

$$\omega = \begin{cases} \frac{\Delta P_m}{D} (1 - e^{-\frac{D}{J}t}) + \omega_n & 0 \leq t \leq T_1 \\ k_2 \left\{ k_3 \cosh(t - T_1) - \frac{k_4 \sinh[k_3(t - T_1)]}{k_3} \right\} \cdot e^{-\frac{(J+DT)(t-T_1)}{2JT}} + \frac{\Delta P_m}{D+k_1} + \omega_n & t > T_1 \end{cases} \quad (16)$$

由式(16)可知,在VSG电磁功率发生变化后,VSG角频率暂态响应是一个分段函数,其中电磁功率突变瞬间记为0时刻,此时VSG处于惯性响应阶段,其一次调频的启动时刻为 $T_1$ 。

另一方面,在惯性响应阶段,VSG角频率暂态响应主要与VSG的阻尼系数、转动惯量等参数有关;在一次调频阶段,VSG角频率暂态响应主要与VSG的阻尼系数、转动惯量、一次调频系数等参数有关。

## 3 模型验证及频率特性分析

### 3.1 模型验证

为开展VSG暂态频率响应数学解析模型时域仿真验证工作,基于Matlab/Simulink仿真软件,本文搭建了VSG仿真模型,并进行负荷投入突增暂态仿真实验。VSG主要参数如下:额定电压 $U_N=690\text{ V}$ ,额定功率 $P_N=1.5\text{ MW}$ ,额定角频率 $\omega_N=314\text{ rad/s}$ ,滤波电感 $L_f=7\text{ mH}$ ,转动惯量 $J=10\text{ kg}\cdot\text{s}^2$ ,阻尼系数 $D=0.005$ ,一次调频系数 $k_1=5$ ,一次调频启动时刻 $T_1=5\text{ s}$ ,一次调频控制器惯性常数 $T=5\text{ s}$ ,电压下垂系数 $k_u=0.7$ ,无功电压控制积分系数 $K=1.2$ 。

在 $t=0\text{ s}$ 时刻开展负荷突增实验,负荷突增功率为VSG额定功率的1%,VSG暂态频率响应仿真验证结果如图5所示。一方面,本文建立的VSG暂态频率响应数学模型与仿真模型结果吻合良好,证明了本文建立的解析数学模型的正确性;另一方面,负荷突增会造成系统有功功率失衡,使系统频率出现较大幅度的偏移。为维持系统有功的平衡,必须使VSG参与系统有功频率辅助服务,协助系统有功恢复至额定值。

### 3.2 特性分析

为掌握VSG暂态频率响应的影响因素与作用机理,增强系统的抗干扰能力,开展VSG暂态

频率特性分析工作。

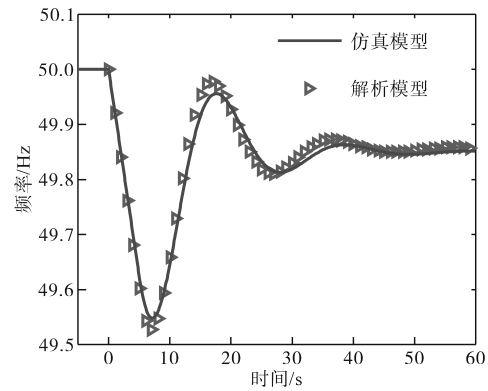


图5 VSG暂态频率响应解析模型与仿真模型结果对比

Fig.5 Comparison of the results between the VSG transient frequency response analytical model and the simulation model

保持其他参数不变,改变VSG转动惯量由 $10\text{ kg}\cdot\text{s}^2$ 变化至 $30\text{ kg}\cdot\text{s}^2$ ,VSG转动惯量对系统暂态频率响应的影响如图6所示,随着转动惯量的增大,一方面,在惯性响应阶段,系统暂态频率响应变化速率减小,为一次调频响应提供充足的预留时间;另一方面,在一次调频阶段,系统暂态频率响应最低点增大,增强了系统频率稳定性。

保持其他参数不变,改变VSG阻尼系数由 $0.005$ 变化至 $0.025$ ,VSG阻尼系数对系统暂态频率响应的影响如图7所示,随着阻尼系数的增大,

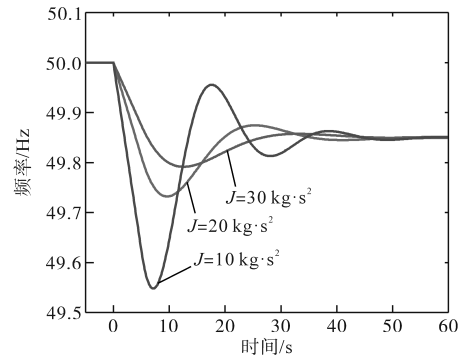


图6 VSG转动惯量对暂态频率响应的影响

Fig.6 Influence of VSG rotational inertia on transient frequency

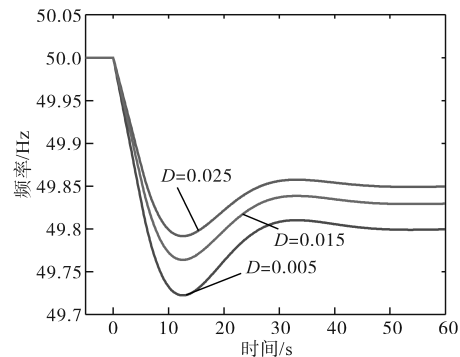


图7 VSG阻尼系数对暂态频率响应的影响

Fig.7 Influence of VSG damping coefficient on transient frequency

一方面,在惯性响应阶段,系统暂态频率响应变化速率减小,为一次调频响应提供充足的预留时间;另一方面,在一次调频阶段,系统暂态频率响应最低点增大,暂态稳定运行工作点升高,增强了系统频率稳定性。

保持其他参数不变,改变VSG一次调频启动时刻由5 s变化至7 s,VSG一次调频启动时刻对系统暂态频率响应的影响如图8所示,随着一次调频启动时刻的减小,系统暂态频率响应最低点升高,降低了系统触发低频减载的风险,增强了系统频率稳定性。

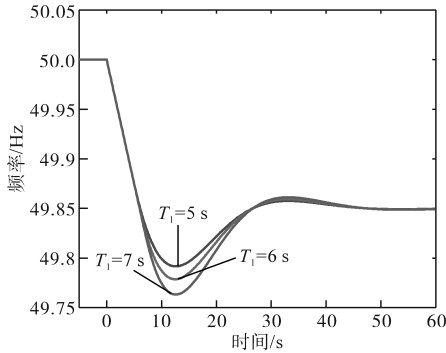


图8 VSG一次调频启动时刻对暂态频率响应的影响  
Fig.8 Influence of VSG start time on transient frequency in primary frequency regulation

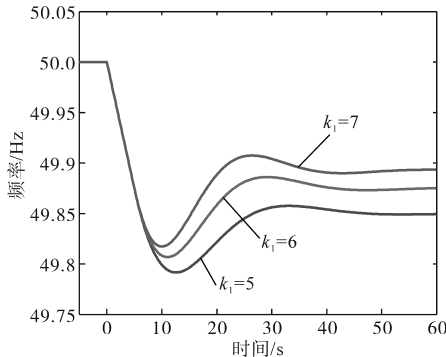


图9 VSG一次调频系数对暂态频率响应的影响  
Fig.9 Influence of VSG primary frequency regulation coefficient on transient frequency

保持其他参数不变,改变VSG一次调频系数由5变化至7,VSG一次调频系数对系统暂态频率响应的影响如图9所示,由图可知,随着一次调频系数的增大,一方面,系统暂态频率响应最低点增大,降低了系统触发低频减载的风险,增强了系统频率稳定性;另一方面,系统暂态频率响应稳态运行点升高,降低了频率稳态误差,有利于系统频率稳定性。保持其他参数不变,改变VSG一次调频控制器惯性常数由3 s变化至5 s,VSG一次调频控制器惯性常数对系统暂态频率响应

的影响如图10所示,随着VSG一次调频控制器惯性常数的减小,一方面,系统暂态频率响应最低点增大,降低了系统触发低频减载的风险,增强了系统频率稳定性;另一方面,系统暂态频率响应达到新的稳态运行工作点的时间减小,降低了暂态频率响应调节时间,有利于系统频率稳定性。

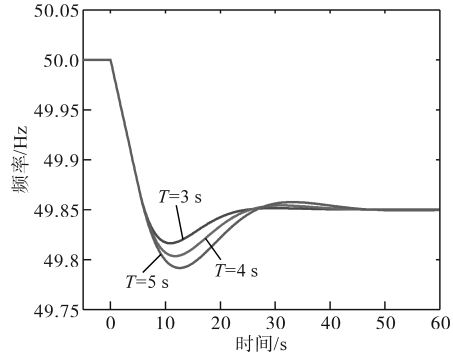


图10 VSG一次调频控制器惯性常数对暂态频率响应的影响  
Fig.10 Influence of VSG time constant of primary frequency regulation controller on transient frequency

#### 4 结论

本文基于虚拟同步发电机的典型控制策略,计及虚拟同步发电机惯性响应、一次调频,建立了虚拟同步发电机的暂态频率响应模型,搭建了基于Matlab/Simulink的VSG仿真模型,开展了数学模型验证与特性分析工作,得到以下几点结论:

- 1) 计及VSG惯性响应、一次调频的VSG暂态频率响应数学模型与仿真模型结果吻合良好,验证了所建立数学解析模型的准确性;
- 2) 随着VSG转动惯量增大、阻尼系数增大,VSG惯性响应阶段的频率变化速率减小;随着VSG转动惯量增大、阻尼系数增大、一次调频系数增大、一次调频控制器惯性常数增大,一次调频阶段的频率最低点增大;随着阻尼系数增大、一次调频系数增大,一次调频稳态误差越小,越有利于VSG的暂态频率稳定。

#### 参考文献

[1] 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.

[2] 吕志鹏, 盛万兴, 刘海涛, 等. 虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 349-359.  
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, LIU Haitao, et al. Application

- and challenge of virtual synchronous machine technology in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 349-359.
- [3] 颜湘武,张伟超,崔森,等. 基于虚拟同步机的电压源逆变器频率响应时域特性和自适应参数设计[J]. 电工技术学报, 2021, 36(S1): 241-254.  
YAN Xiangwu, ZHANG Weichao, CUI Sen, et al. Frequency response characteristics and adaptive parameter tuning of voltage-sourced converters under VSG control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S1): 241-254.
- [4] 邢东峰,田铭兴. 虚拟同步发电机频率特性与储能设备容量及充放电特性的关系[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3582-3590.  
XING Dongfeng, TIAN Mingxing. Relationship between frequency characteristics of virtual synchronous generator and parameters of energy storage equipment[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3582-3590.
- [5] 贾焦心,颜湘武,杨鹏,等. 多VSC系统有功-频率动态的电路建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1933-1945.  
JIA Jiaoxin, YAN Xiangwu, YANG Peng, et al. Circuit modeling method of active power-frequency dynamics for multiple-VSC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1933-1945.
- [6] 秦本双,徐永海,袁敞,等. 多VSG并网系统的P/ω 导纳建模及功频振荡分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2932-2941.  
QIN Benshuang, XU Yonghai, YUAN Chang, et al. The P/ω admittance modeling and power-frequency oscillation analysis of multi-VSGs grid-connected systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2932-2941.
- [7] 秦本双,徐永海,贾焦心. 基于机械导纳法的SGs/VSGs转矩-频率动力学建模与分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21): 6903-6912.  
QIN Benshuang, XU Yonghai, JIA Jiaoxin. Modeling and analysis of SGs/VSGs torque-frequency dynamics based on mechanical admittance method[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6903-6912.
- [8] 和萍,李钊,李从善,等. 基于虚拟同步机技术的储能机电暂态特性建模[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 11-22.  
HE Ping, LI Zhao, LI Congshan, et al. Electromechanical transient modeling of energy storage based on virtual synchronous machine technology[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 11-22.
- [9] 曾正,邵伟华. 基于线性化模型的虚拟同步发电机惯性和阻尼辨识[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(10): 37-43, 81.  
ZENG Zheng, SHAO Weihua. Estimation of inertia and damping for virtual synchronous generator based on linearized model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(10): 37-43, 81.
- [10] 吴恒,阮新波,杨东升,等. 虚拟同步发电机环的建模与参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6508-6518.  
WU Heng, RUAN Xinbo, YANG Dongsheng, et al. Modeling of the power loop and parameter design of virtual synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6508-6518.
- [11] WU H, RUAN X, YANG D, et al. Small-signal modeling and parameters design for virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4292-4303.
- [12] 邵天聪. 虚拟同步机暂态特性研究和优化[D]. 北京:北京交通大学, 2018.  
SHAO Tiancong. Virtual synchronous machines transient characteristic research and improvement[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [13] RODRIGUEZ C, ROLDAN P, PRODANOVIC Milan. Virtual impedance design considerations for virtual synchronous machines in weak grids[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 8(2): 1477-1489.
- [14] DRIESEN J, VISSCHER K. Virtual synchronous generators[C]// 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008, USA: 1-3.
- [15] LI D, ZHU Q, LIN S, et al. A self-adaptive inertia and damping combination control of VSG to support frequency stability[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(1): 397-398.
- [16] FANG J, TANG Y, LI H, et al. A battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for implementing the power management of virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(4): 2820-2824.
- [17] MA Y, CAO W, YANG L, et al. Virtual synchronous generator control of full converter wind turbines with short-term energy storage[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(11): 8821-8831.
- [18] PAN D, WANG X, LIU F, et al. Transient stability of voltage-source converters with grid-forming control: a design-oriented study[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1019-1033.
- [19] LIU J, MIURA Y, ISE T. Comparison of dynamic characteristics between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3600-3611.

收稿日期:2022-12-20

修改稿日期:2023-04-19