

DOI: 10.13382/j.jemi.B2307150

考虑负荷动态变化的孤岛微电网二次频率控制*

刘鹏辉^{1,2} 郑克影¹ 朱 军^{1,3} 戴瑜兴²

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454003; 2. 广东志成冠军集团有限公司 东莞 523711;
3. 河南省煤矿装备智能检测与控制重点实验室 焦作 454003)

摘 要:传统虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)二次调频策略未考虑负荷动态变化时频率偏差持续变化引发的积分器不断累加,易导致 VSG 调频效果不佳甚至引发频率振荡问题。针对此问题,提出了一种基于负荷扰动模式辨识和 VSG 自适应调整的孤岛微电网二次频率控制策略。首先,分析了传统 VSG 二次调频策略在负荷动态变化场景中存在的问题。然后,利用负荷功率特征数据实时辨识负荷扰动模式;当判定负荷扰动属动态变化模式后,以二次调频阈值与有功变化阈值为边界,根据系统频率偏移量自适应调整 VSG 参数与虚拟调速器结构,实施微电网频率的跟踪调节。之后,通过建立小信号模型分析了积分器引入及 VSG 参数自适应调整情况下的系统稳定性。最后,仿真测试结果验证了所提频率控制策略的可行性。在相同条件下,相比于几种已有策略,所提策略将微电网二次频率波动范围限制在 0.017 3 Hz 以内,在减小频率偏移量方面更具优势。

关键词: 负荷扰动模式辨识;二次频率控制;自适应调整;虚拟同步发电机

中图分类号: TM761;TN707 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Secondary frequency control of isolated microgrid with consideration of dynamic varying loads

Liu Penghui^{1,2} Zheng Keying¹ Zhu Jun^{1,3} Dai Yuxing²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;
2. Guangdong Zhicheng Champion Group Co., Ltd., Dongguan 523711, China; 3. Henan Key Laboratory of
Intelligent Detection and Control of Coal Mine Equipment, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: In the scenario with dynamic varying loads, for the traditional VSG secondary frequency modulation strategy, the integrator continuously accumulates due to the continuous change of frequency deviation, which may lead to poor frequency adjustment effect and even frequency oscillation. For improvement, a secondary frequency modulation method of isolated microgrid, which based on the identification of load disturbance modes and adaptive adjustment of VSG, is proposed in this paper. Firstly, the issues in the traditional VSG secondary frequency regulation strategy of dynamic varying loads are analyzed. Then, the power characteristic data is used to discern the modes of load disturbances in real time. When the secondary frequency modulation is requisite for the microgrid, and the load disturbance is classified the mode of dynamic change, the parameters and virtual governor structure of VSG are changed by an adaptive adjustment. The adjustment is predicated on the deviations of frequency and bounded by the thresholds of secondary frequency regulation and active power change, thus enabling the frequency tracking in the microgrid. Further, a small signal model is constructed to evaluate the implications on system stability prompted by the incorporation of an integrator and the flexible adjustment of VSG parameters. Finally, the feasibility of the proposed frequency modulation strategy is verified by the results of simulation testing. When compared with the other existing strategies under the same conditions, the proposed strategy limits the range of secondary frequency fluctuation of microgrid within 0.017 3 Hz, which exhibits significant merits in decreasing the magnitude of frequency offsets.

Keywords: load disturbance mode identification; secondary frequency control; self-adaptation modulation; virtual synchronous generator

0 引言

传统微电网逆变器存在容量小、输出阻抗低、缺乏惯性等问题^[1-2],使微电网安全稳定运行面临巨大挑战。为解决此问题,国内外专家学者提出了许多新技术,其中模仿同步发电机转子惯性与阻尼特性的虚拟同步发电机^[3-5]技术受到了广泛关注。该技术通过在逆变器控制算法中引入发电机转子运动方程,使其具备与传统旋转同步发电机相同的外特性,从而提高系统的频率与电压稳定性^[6-7]。

针对微电网频率稳定问题,文献[8]提出将 VSG 等效为受控电流源的电流控制型 VSG 技术,但此方法存在面对孤岛微电网时难以提供频率支持的缺陷。为弥补上述方法的不足,文献[9-10]提出了模拟同步发电机外特性的电压控制型 VSG 技术,使得 VSG 技术得以广泛应用。文献[11-12]指出了微电网孤岛运行模式下存在的问题以及系统稳定运行的研究方向。但是针对 VSG 设计,目前许多文献仅是模拟同步发电机一次调频功能,本质上属于有差调节,没有充分考虑 VSG 技术二次调频与系统频率无差恢复等问题。当面对微电网大负荷投切等复杂运行情况时,系统内部将会存在频率偏移甚至是越限情况^[13]。鉴于此,许多文献开展了对 VSG 频率二次调频的研究。文献[14-15]提出了采用通信传递信息的方法实现微电网系统频率的无差恢复,但信号传输过程中容易受到干扰,运行可靠性较差。文献[16-18]提出了在微电网调频控制环节引入 PI 控制器实现频率无差调节的传统 VSG 二次调频策略,然而,在方案设计环节中未充分考虑负荷动态变化情况,测试验证环节也均基于常规恒定负荷投切。文献[19-21]提出了基于 VSG 参数自适应变化的孤岛微电网二次调频策略,但受参数调节范围的限制,调频区域有限。

针对此问题,为进一步提升负荷动态变化场景中传统 VSG 二次调频策略的调频能力,减少系统内部频率波动,提出了一种基于负荷扰动模式辨识和 VSG 自适应调整的孤岛微电网二次频率控制策略。具体地,对微电网运行数据进行采样与处理,利用负荷功率特征数据实时辨识负荷扰动模式。当判定负荷扰动属动态变化模式后,采用根据系统频率偏移量自适应调整 VSG 参数与虚拟调速器结构的策略,实施微电网频率的跟踪调节;否则,采用在 VSG 功频控制环路引入积分器构成 PI 控制器的方法实现频率的无差调节。之后,通过建立小信号模型,分析了积分器的引入及 VSG 参数自适应调整情况下的系统稳定性;并进行了仿真验证与对比分析。

1 VSG 控制策略与传统 VSG 二次调频策略存在的问题分析

1.1 VSG 控制策略

为更好地阻止系统频率突变,保证分布式电源经逆变后的电能质量,采用在逆变器控制上引入同步发电机电机暂态方程的 VSG 技术保证逆变器输出频率和电压幅值的稳定性,如图 1 所示。图中, U_{dc} 为分布式电源与储能装置等效的理想直流电压源; L_f 、 C_f 分别代表微电网 LC 滤波器的滤波电感与电容,其中滤波器通过对逆变器输出电压滤波来减小开关引起的电压波动; u_{abc} 、 i_{abc} 为逆变器输出端电压与电流; i_a 、 i_b 、 i_c 为逆变器输出端三相电流; P_{ref} 、 Q_{ref} 为 VSG 的有功与无功功率给定值; P_e 、 Q_e 为逆变器输出的有功与无功功率;将逆变器输出的有功与无功功率 P_e 、 Q_e 送入到 VSG 的控制模块得到三相感应电动势 u_a 、 u_b 、 u_c ,将电动势送入到 SPWM 模块中,得到脉冲触发信号后送到三相逆变桥内控制微电网正常运行。

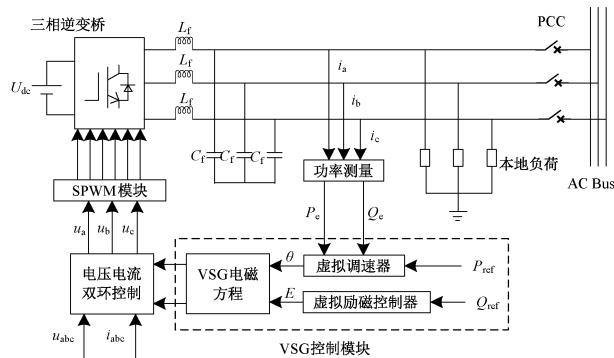


图 1 VSG 主电路及控制结构

Fig. 1 Main circuit of VSG and its control structure diagram

采用模拟同步发电机二阶模型的 VSG 技术实现对逆变器的控制。假设发电机极对数为 1,电角速度等于机械角速度,VSG 转子运动方程^[22]可表示为:

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

式中: J 为 VSG 虚拟惯量; P_m 为 VSG 模拟的发电机原动机输入机械功率,在 VSG 算法中由虚拟调速器结构给出; P_e 为逆变器输出有功功率; D 为 VSG 阻尼系数,模拟发电机阻尼绕组; ω 、 ω_0 分别为 VSG 角速度的实际值与额定值,通常情况下 ω_0 与系统角速度额定值 ω_{ref} 相等; θ 为功角。

为使 VSG 像传统同步发电机一样针对系统内变化幅度小、周期短的负荷扰动进行一次调频,引入有功频率偏差反馈环节,即虚拟调速器环节如图 2 所示。

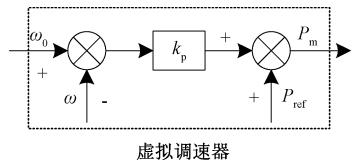


图2 虚拟调速器结构

Fig. 2 Structure diagram of virtual governor

其中,虚拟调速器环节原理为:

$$P_m = P_{ref} + k_p(\omega_0 - \omega) \quad (2)$$

式中: P_{ref} 为 VSG 的有功功率给定值; k_p 为有功频率偏差反馈系数; ω 、 ω_0 分别为 VSG 角速度的实际值与额定值。

当孤岛微电网出现变化幅度小、变化周期短的负荷扰动时,虚拟调速器可以相应增加或减少发电机原机的输出功率从而减小频率波动,相当于电力系统一次调频环节。但当微电网出现变化幅度较大、变化周期较长的负荷扰动时,引入二次调频环节来满足电网稳定性要求^[23]。

通过模拟传统同步发电机励磁控制原理对虚拟励磁控制器进行设计,使 VSG 像电力系统内发电机一样针对电网内电压波动进行调整。虚拟励磁控制器控制模块由无功电压下垂控制和 PI 控制组成,如图 3 所示。其中,无功电压下垂控制方程为:

$$U_m = U_{ref} + k_q(Q_{ref} - Q_e) \quad (3)$$

式中: U_{ref} 为 VSG 电压的给定值,一般与微电网额定运行电压相等; Q_{ref} 、 Q_e 为 VSG 无功功率的给定值与实际值; k_q 为无功电压下垂系数。经过无功电压下垂控制得到的 VSG 输出电压幅值 U_m 与实际输出电压 U_e 的差值经过 PI 控制器可得到 VSG 励磁电动势的参考值 E 。

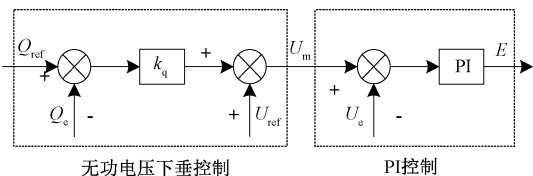


图3 虚拟励磁控制器结构

Fig. 3 Structure diagram of virtual excitation controller

1.2 传统 VSG 二次调频策略存在的问题分析

当孤岛微电网出现变化幅度较大、变化周期较长的负荷扰动时,传统 VSG 二次调频策略采用将积分器引入到 VSG 功频控制环路,与阻尼系数组成 PI 控制器的方法实现频率的无差调节,如图 4 所示。

其中,引入积分器与阻尼系数构成 PI 控制器实现频

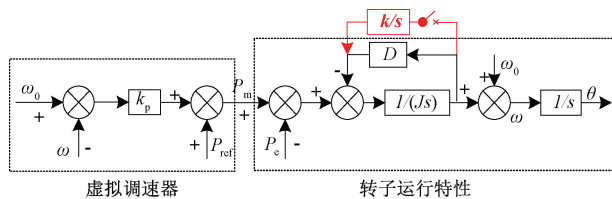


图4 有功频率控制图

Fig. 4 Control diagram of active power and frequency

率无差调节的原理如下:

1) 引入积分器后,式(1)可变形为:

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m}{\omega_0} - \frac{P_e}{\omega_0} - (D + \frac{k}{s})(\omega - \omega_0) \quad (4)$$

2) 联立式(2)、(4),并进行拉普拉斯变换可得:

$$\Delta\omega = \omega - \omega_0 = \frac{(P_{ref} - P_e)s}{J\omega_0 s^2 + (k_p + D)s + k\omega_0} \quad (5)$$

3) 由终值定理可得:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta\omega = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{(P_{ref} - P_e)s}{J\omega_0 s^2 + (k_p + D)s + k\omega_0} = 0 \quad (6)$$

式中: k_p 为有功频率偏差反馈系数, k 为积分器积分系数。

如式(6)所示,当微电网内负荷扰动满足 PI 控制器工作原理,即投切常规恒定负荷时,电网内频率偏差经过积分器的累加最终为 0,实现频率无差调节;但当微电网内负荷扰动动态变化时,电网内频率偏差持续变化将引发积分器输出不断累加,无法满足消除偏差的目标,甚至会导致频率振荡。因此,针对传统 VSG 二次调频策略,需定义投切常规负荷扰动与动态变化负荷扰动两种模式,并分别进行针对性频率调节设计,增强孤岛微电网运行时的频率稳定性与抗干扰性。

2 考虑负荷动态变化的孤岛微电网二次频率控制策略

针对传统 VSG 二次调频策略在负荷动态变化场景中存在的问题,本文所提策略的具体实施流程如图 5 所示。具体地,根据微电网负荷扰动变化时的特征参量差异,利用负荷功率特征数据实时辨识负荷扰动模式。本文将负荷扰动分为两种模式:常规变化模式与动态变化模式。当判定负荷扰动属动态变化模式后,采用根据系统频率偏移量自适应调整 VSG 参数与调速器结构的策略,实施微电网频率的跟踪调节;当判定负荷扰动属常规变化模式时,采用在 VSG 功频控制环路引入积分器构成 PI 控制器的方法实现频率的无差调节。

2.1 基于偏度特征数据的负荷扰动模式辨识

图 6(a)、(b) 为微电网内投切常规变化负荷与动态

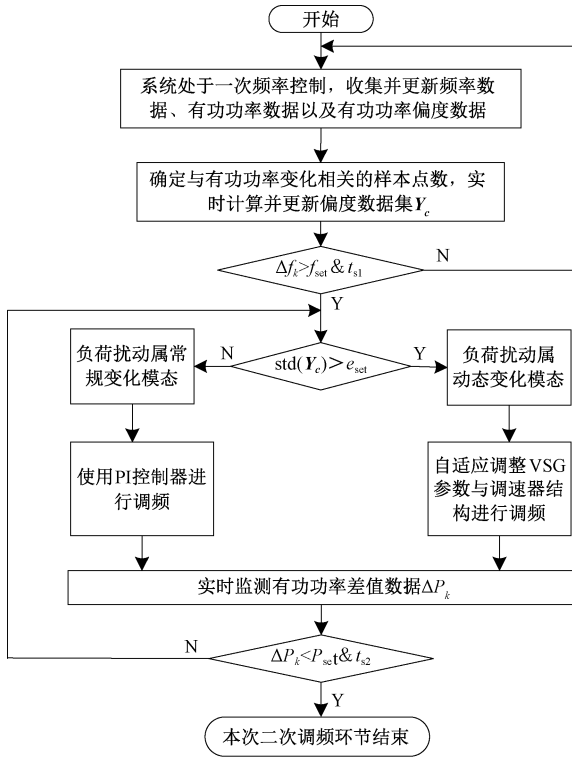


图 5 所提策略实施流程

Fig. 5 Implementation flow chart of the proposed strategy

变化负荷时的有功功率波动图。其中,图 6(a)所设定的负荷有功功率变化情况为,0.4 s 时负荷由 50 kW 跃变为 55 kW;图 6(b)所设定的功率变化情况为,0.4 s 后负荷有功功率在 45~55 kW 范围内动态变化。图 6 左侧纵坐标表示电网中有功功率的大小,右侧纵坐标表示电网中相对应电流的大小;虚线表示微电网中有功功率的变化,实线表示微电网中相对应电流的变化。

为便于观察特征,对电网中有功功率数据进行计算处理得到相对应的有功功率偏度数据 H_k ,其波动曲线如图 7(a)、(b)所示。由图 7(a)可知,对于投切常规负荷扰动情况,在负荷扰动导致的一段时间内有功功率偏度数据变化过渡过程之后,有功功率偏度数据进入“稳态区段”。而对于投切动态变化负荷扰动情况,如图 7(b)所示,在扰动导致的一段时间的过渡过程之后,不存在“稳态区段”。以投切负荷扰动后,微电网内有功功率偏度数据是否存在“稳态区段”为特征,表征投切常规负荷扰动与动态变化负荷扰动时微电网内部有功功率的差异,进而区分负荷扰动模式。

具体地,以某一时刻为起点,以 V 个数据采样值为步长进行计算,经如下步骤辨识负荷扰动模式:

1) 对微电网孤岛运行状态下的频率与有功功率进行实时采样,得到微电网运行时的频率数据与有功功率数据。

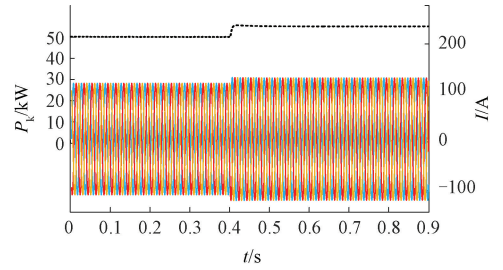
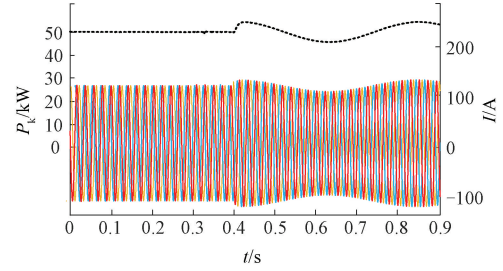
(a) 投切常规负荷扰动时的有功功率波动图
(a) Fluctuation diagram of active power when switching the disturbance of conventional loads(b) 投切动态变化负荷扰动时的有功功率波动图
(b) Fluctuation diagram of active power when switching the disturbance of dynamic loads

图 6 有功功率波动图

Fig. 6 Fluctuation diagram of active power

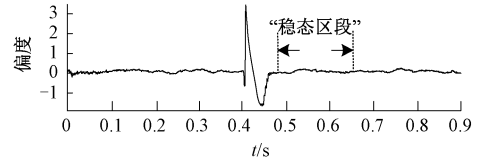
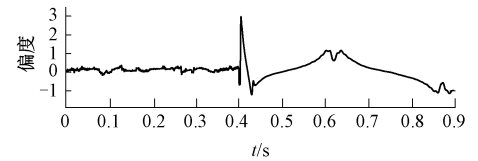
(a) 投切常规负荷扰动时的偏度数据曲线
(a) Curve diagram of skewness data when switching the disturbance of conventional loads(b) 投切动态变化负荷扰动时的偏度数据曲线
(b) Curve diagram of skewness data when switching the disturbance of dynamic loads

图 7 偏度数据曲线

Fig. 7 Curve diagram of skewness data

2) 获取频率差值数据 Δf_k 、有功功率差值数据 ΔP_k 与有功功率偏度数据 H_k :

$$\begin{cases} \Delta f_k = |f_k - f_{ref}| \\ \Delta P_k = |P_k - P_{ref}| \end{cases} \quad (7)$$

$$H_k = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^V \frac{(P_{k-i+1} - \mu)^3}{\sigma^3} \quad (8)$$

式中: f_k 为微电网运行频率数据的采样值; P_k 、 P_{k-i+1} 为有

功率数据的采样值; k 为采样序号; f_{ref} 为微电网额定频率; P_{ref} 为VSG有功功率的给定值; V 为有功功率偏度数据的计算步长; μ 、 σ 为计算周期内有功功率数据的平均值和方差。

3) 根据式(9)确定与有功功率相关的样本点数,实时计算并更新有功功率偏度数据集 $\mathbf{Y}_c$:

$$\begin{cases} x = \max\{P_a, P_b\} \\ y = x + V \\ z = \min\{H_d, H_g\} \end{cases} \quad (9)$$

$$\mathbf{Y}_c = [H_{k+y}, H_{k+y+z}] \quad (10)$$

式中: $\{P_a, P_b\}$ 为微电网负荷扰动导致的一段时间内有功功率偏度数据变化过渡过程中的有功功率数据采样值集合; $\{H_d, H_g\}$ 为“稳态区间”内有功功率偏度数据的采样值集合; x 为负荷扰动导致的一段时间内有功功率偏度数据变化过渡过程中有功功率数据的总样本点数; y 为负荷扰动导致的一段时间内有功功率偏度数据变化过渡过程的总样本点数; z 为“稳态区间”内有功功率偏度数据的总样本点数; $\mathbf{Y}_c$ 为所求取的偏度数据集。

4) 实时比较微电网运行时的频率差值数据 Δf_k 与微电网二次调频阈值 f_{set} , 当 $\Delta f_k > f_{\text{set}}$ 并保持一段时间 t_{sl} 时, 根据式(11)判定负荷扰动模式:

$$\text{std}(\mathbf{Y}_c) > e_{\text{set}} \quad (11)$$

式中: t_{sl} 为判定微电网需要二次调频时的容错时间,由微电网运行情况决定; $\text{std}(\mathbf{Y}_c)$ 为对有功功率偏度数据集内的偏度数据求标准差,表征微电网负荷扰动变化时的特征参量差异; e_{set} 为将负荷扰动模式区分的负荷功率偏度特征数据值;当满足 $\text{std}(\mathbf{Y}_c) > e_{\text{set}}$ 时,表示在负荷扰动导致的一段时间的过渡过程之后,负荷扰动有功功率偏度数据不存在“稳态区段”,判定负荷属动态变化模式。否则表明在负荷扰动导致的一段时间过渡之后,负荷扰动偏度数据不存在“稳态区段”,判定负荷属常规变化模式。

2.2 VSG 参数自适应调整

传统同步发电机通过调速器实时改变原动机出力^[24],当原动机出力改变量完全抵消负荷扰动时,可以实现系统频率的无差调节。考虑VSG模拟原动机出力改变量主要依靠储能装置,且与系统内部频率偏差有关。为减少系统对原动机储能装置依赖性,当判定负荷扰动属动态变化模式后,在VSG参数取值范围内,采用自适应调整VSG参数数值减小系统内部频率差值。

1) 初始参数整定

根据并网逆变器接入电网连续运行标准 EN50438, 阻尼系数 D 的取值范围由式(12)确定。

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{\Delta P}{\omega_0} - D\Delta\omega \\ \omega_0 = 2 \times \pi \times f_{\text{ref}} \\ \Delta\omega = \omega - \omega_0 \\ 0.4P_{\text{ref}} \leq \Delta P \leq P_{\text{ref}} \end{cases} \quad (12)$$

式中: ΔP 为逆变器有功功率的输出范围; f_{ref} 为微电网运行频率的额定值; P_{ref} 为有功功率的给定值; ω 、 ω_0 为角速度的实际值与额定值。

根据微电网有功闭环传递函数与二阶系统阻尼特性,VSG虚拟惯量 J 的取值范围由式(13)确定。

$$\begin{cases} \Phi_P(s) = \frac{P_c(s)}{P_{\text{ref}}(s)} = \frac{\frac{3EU_e}{J\omega_0 X}}{s^2 + (\frac{D}{J} + \frac{k_p}{J\omega_N})s + \frac{3EU_e}{J\omega_0 X}} \\ \xi = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{\omega_0 X}{3JEU_e}} + \frac{k_p}{2} \sqrt{\frac{X}{3JEU_e \omega_0}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: E 为VSG励磁电动势的参考值; U_e 为VSG的输出端口电压; X 为微电网虚拟同步发电机的等效输出感抗; ξ 为二阶系统阻尼比; k_p 为有功频率偏差反馈系数。

基于以上分析,在考虑系统容量和稳定性的情况下,当 ξ 为最佳阻尼比 0.707 时,本文涉及的VSG参数取值范围如式(14)所示。

$$\begin{cases} 10.14 \leq D \leq 25.36 \\ 0.13 \leq J \leq 0.84 \end{cases} \quad (14)$$

2) VSG 参数自适应调整策略

由VSG设计可知,模拟传统发电机阻尼绕组特性的阻尼系数 D 不受硬件条件限制,在由VSG控制的微电网内可以自适应调整数值。于是,在负荷动态变化场景中,所提策略通过自适应调整VSG阻尼系数 D 的取值来减小系统内部频率差值。

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m - P_e}{\omega_0} - D(\omega - \omega_0) \quad (15)$$

由式(15)可知,当微电网处于稳定运行状态时,阻尼系数 D 越大,电网角速度偏差越小,频率偏移量越小。且由系统动态特性可知,调整阻尼系数 D 及虚拟惯量 J 可以改变系统的阻尼比,进而改善系统动态性能。因此,当在VSG参数取值范围内,根据微电网运行实际情况对VSG阻尼系数 D 与虚拟惯量 J 的数值进行自适应调整时,可以减小系统内部频率偏移量,从而能减小系统对原动机储能装置的依赖性。

考虑参数取值范围、阻尼系数 D 与频率偏移量 Δf 之间的相关性、阻尼系数 D 与虚拟惯量 J 之间的相关性,设计的参数自适应调整策略如下:

$$D = \begin{cases} D_0 = D_{\min}, & |\Delta f| \leq f_{\text{set}} \\ D_0 + k_D \Delta f, & |\Delta f| \geq f_{\text{set}} \text{ \& } |\Delta P| \leq P_{\text{on}} \\ D_{\max}, & |\Delta f| \geq f_{\text{set}} \text{ \& } |\Delta P| > P_{\text{on}} \end{cases} \quad (16)$$

$$J = \begin{cases} J_0 = J_{\min}, & |\Delta f| \leq f_{\text{set}} \\ \frac{D^2}{4} \frac{\omega_0}{3U_e E \xi^2}, & |\Delta f| > f_{\text{set}} \text{ \& } |\Delta P| \leq P_{\text{on}} \\ J_{\max}, & |\Delta f| > f_{\text{set}} \text{ \& } |\Delta P| > P_{\text{on}} \end{cases} \quad (17)$$

式中: D_0 、 J_0 为 VSG 未受动态变化负荷扰动时的阻尼系数与虚拟惯量; D 、 J 为二次频率控制时自适应调整出的 VSG 参数; k_D 为 VSG 受动态变化负荷扰动时阻尼系数 D 的调节系数; Δf 为微电网频率差值数据; P_{on} 为有功功率变化阈值; f_{set} 为微电网二次调频阈值; $D_{\min}$ 、 $D_{\max}$ 、 $J_{\min}$ 、 $J_{\max}$ 分别为考虑系统稳定性时阻尼系数与虚拟惯量的取值范围。

其中, f_{set} 的取值根据电力系统调频原理确定; 调节系数 k_D 以及有功功率变化阈值 P_{on} 的取值对系统频率稳定的快速性和准确性有一定的影响, 需要根据实际情况进行选择。

2.3 VSG 虚拟调速器结构自适应调整

经过上述 VSG 参数自适应调整策略, 系统内部频率偏移量减小, 对原动机储能装置依赖性降低。但受 VSG 参数取值范围与调频原理的限制, 以上策略难以满足系统频率无差调节的要求。于是, 在微电网负荷动态变化场景中, 经 VSG 参数自适应调整策略减小系统频率差值后, 采用根据系统频率偏移量自适应调整虚拟调速器结构的策略, 实施对微电网频率的跟踪调节。

1) 虚拟调速器结构分析

根据 VSG 设计的虚拟调速器结构式(18)可知, k_p 为有功频率偏差反馈系数; ω 、 ω_0 为 VSG 角速度的实际值与额定值; P_m 为 VSG 模拟的发电机原动机输入机械功率。

$$P_m = P_{\text{ref}} + k_p(\omega_0 - \omega) \quad (18)$$

在负荷动态变化场景中, 经过 VSG 参数自适应调整策略后, 系统角速度实际值与额定值的差值($\omega_0 - \omega$) 减小, 使得 VSG 模拟的发电机原动机输入机械功率 P_m 相应减小, 系统对原动机储能装置的依赖性降低。

2) VSG 虚拟调速器结构自适应调整策略

根据传统同步发电机调频方法与虚拟调速器结构可知, 当改变虚拟调速器结构, 增加出力波动使系统内部功率波动与负荷扰动相适应时, 可以实现微电网频率的跟踪调节。

如图 8 所示, ΔP_t 为新增出力波动, VSG 模拟的发电机原动机输入机械功率 P_m 变为:

$$P_m = P_{\text{ref}} + \Delta P_t + k_p(\omega_0 - \omega) \quad (19)$$

VSG 虚拟调速器结构自适应调整策略为: 定义出力

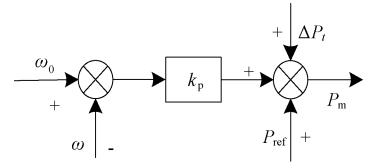


图 8 增加出力的虚拟调速器结构

Fig. 8 Structure diagram of the virtual governor for increasing outputs

波动系数 k_t , 根据微电网频率偏移量实时改变调速器结构, 使新增出力波动与微电网负荷扰动相适应, 进而实现对微电网频率的跟踪调节, 如式(20)所示。

$$\Delta P_t = k_t(f - f_{\text{ref}}) \quad (20)$$

式中: ΔP_t 为新增出力波动, 与调速器环节配置的储能出力有关; k_t 为出力波动系数; f 、 f_{ref} 为微电网某段时间内运行频率的实际值与额定值。则考虑出力波动开启条件的 VSG 虚拟调速器结构自适应调整策略如图 9 虚线框内所示。

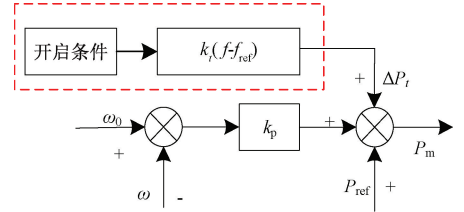


图 9 虚拟调速器结构

Fig. 9 Structure diagram of virtual governor

考虑负荷扰动模态与调频环节的影响, 出力波动开启条件为: 微电网内频率偏差大于一二次调频阈值 f_{set} 且判定负荷扰动属动态变化模态。

当微电网需要进行二次调频且判定负荷扰动属动态变化模态时, 根据系统频率偏移量自适应调整 VSG 参数与虚拟调速器结构, 实施微电网频率的跟踪调节。

3 系统稳定性分析

本节通过建立小信号模型, 分析投切常规负荷扰动情况下积分器的引入及动态变化负荷扰动情况下 VSG 参数自适应调整对系统稳定性的影响。

3.1 建立系统小信号模型

1) 建立如图 10 所示的孤岛微电网小信号模型。其中, $E \angle \theta$ 为逆变器输出电压参考值, $S = P + jQ$ 为逆变器输出的视在功率, $Z_1 = R_1 + jX_1$ 、 $Z_L = R_L + jX_L$ 为线路阻抗与负载阻抗, $Z = R + jX$ 表示线路阻抗与负载阻抗总和。

2) 由式(21)可得逆变器输出有功功率 P_e 与无功功率 Q_e 。

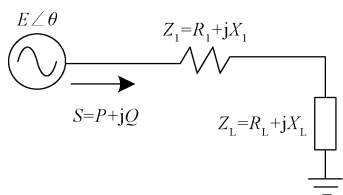


图 10 孤岛微电网小信号模型

Fig. 10 Small signal model of isolated microgrid

$$\begin{cases} P_e = \frac{E^2}{R^2 + X^2} [2X \sin \theta \cdot \cos \theta + R(\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)] \\ Q_e = \frac{E^2}{R^2 + X^2} [2R \sin \theta \cdot \cos \theta - X(\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)] \end{cases} \quad (21)$$

3) 对式(21)进行线性化处理并化简可得系统逆变器输出有功功率与无功功率的差值公式。

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta P_e &= \frac{\partial P}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial P}{\partial E} \Delta E = \frac{2E^2}{R^2 + X^2} (X \cos 2\theta - R \sin 2\theta) \Delta \theta + \\ &\quad \frac{2E}{R^2 + X^2} (R \cos 2\theta + X \sin 2\theta) \Delta E = A \Delta \theta + B \Delta E \\ \Delta Q_e &= \frac{\partial Q}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial Q}{\partial E} \Delta E = \frac{2E^2}{R^2 + X^2} (R \cos 2\theta + X \sin 2\theta) \Delta \theta + \\ &\quad \frac{2E}{R^2 + X^2} (R \sin 2\theta - X \cos 2\theta) \Delta E = C \Delta \theta + D \Delta E \end{aligned} \right. \quad (22)$$

其中,式(22)内参数 A 、 B 、 C 、 D 如式(23)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} A &= \frac{2E^2}{R^2 + X^2}(X\cos 2\theta - R\sin 2\theta) \\ B &= \frac{2E}{R^2 + X^2}(R\cos 2\theta + X\sin 2\theta) \\ C &= \frac{2E^2}{R^2 + X^2}(R\cos 2\theta + X\sin 2\theta) \\ D &= \frac{2E}{R^2 + X^2}(R\sin 2\theta - X\cos 2\theta) \end{aligned} \right. \quad (23)$$

3.2 积分器的引入对系统稳定性的影响分析

1) 假设微电网内部有功功率环路与无功功率环路解耦,忽略虚拟调速器的作用,结合式(3)~(5)和(22)可得离网状态下 VSG 功率外环模型如图 11 所示。

2) 根据图 11 可得系统有功环路闭环传递函数 $\Phi_p(s)$ 为:

$$\Phi_p(s) = \frac{A}{J\omega_0 s^2 + D\omega_0 s + k\omega_0 + A} \quad (24)$$

3) 计算可得以 k 为开环增益的传递函数 $G_p(s)$ 如式(25)所示。

$$G_p(s) = \frac{k}{Js^2 + Ds + \frac{A}{\omega_0}} \quad (25)$$

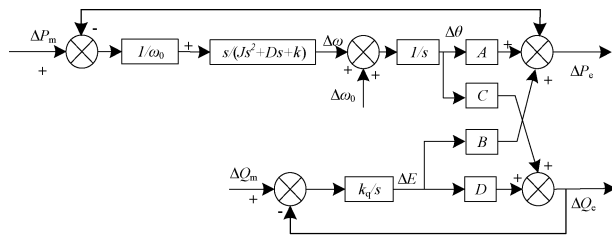


图 11 功率外环模型

Fig. 11 Model diagram of power outer loop

4) 根据图 12 所示的传递函数 $G_p(s)$ 根轨迹可知, 引入积分系数 k 后, 系统共有一对共轭复根, 且随着系数 k 的增大, 系统根轨迹始终位于虚轴的左侧。因此, 积分器的引入不会影响系统自身稳定性。但随着积分系数 k 的增大, 系统复根远离实轴, 超调量的增加容易导致电网内有功功率的超调和震荡, 需要根据实际需求对 k 进行合理取值。

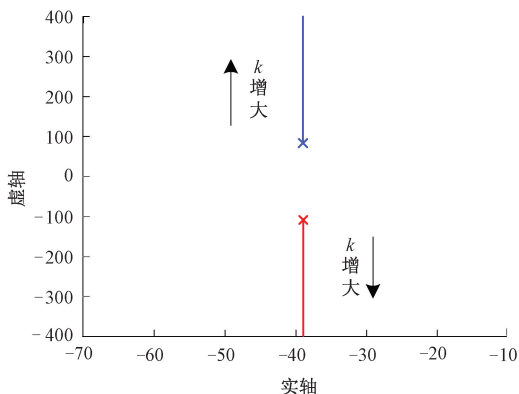
图 12 传递函数 $G_p(s)$ 根轨迹图

Fig. 12 Root locus diagram of transfer function $G_p(s)$

3.3 VSG 参数自适应调整对系统稳定性的影响分析

1)当微电网负荷扰动属动态变化模态时,由式(1)和(2)可得离网状态下的系统功频特性为:

$$\frac{\omega - \omega_0}{P_{\text{ref}} - P_e} = \frac{1}{J\omega_0 s + D\omega_0 + k_v} \quad (26)$$

2) 忽略微电网无功功率环路影响,由式(1)~(2)和(22)可得离网状态下系统有功功率闭环模型如图13所示。

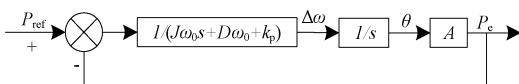


图 13 有功功率闭环模型

Fig. 13 Closed loop model diagram of active power

3) 根据图 13 可得系统有功功率闭环传递函数 $\Phi_p(s)$ 、有功功率开环传递函数 $G_p(s)$ 和频率开环传递函

数 $G_{\omega}(s)$ 为:

$$\begin{cases} \Phi_p(s) = \frac{A}{J\omega_0 s^2 + (D\omega_0 + k_p)s + A} \\ G_p(s) = \frac{A}{J\omega_0 s^2 + (D\omega_0 + k_p)s} \\ G_{\omega}(s) = \frac{A}{J\omega_0 s^2 + (D\omega_0 + k_p)s} \end{cases} \quad (27)$$

4) 计算可得以 J 为定量、 D 为参变量的有功功率开环传递函数 $G_{p-D}(s)$ 和以 D 为定量、 J 为参变量的有功功率开环传递函数 $G_{p-J}(s)$ 如式 (28) 所示。

$$\begin{cases} G_{p-D}(s) = \frac{Ds}{Js^2 + \frac{k_p}{\omega_0}s + \frac{A}{\omega_0}} \\ G_{p-J}(s) = \frac{Js^2}{(D + \frac{k_p}{\omega_0})s + \frac{A}{\omega_0}} \end{cases} \quad (28)$$

5) 根据图 14、15 所示的传递函数 $G_{p-D}(s)$ 与 $G_{p-J}(s)$ 对应的根轨迹可知,当在一定范围内改变 VSG 参数 D 与 J 的取值时,系统动态性能有所改善且不会改变原有系统的稳定性。

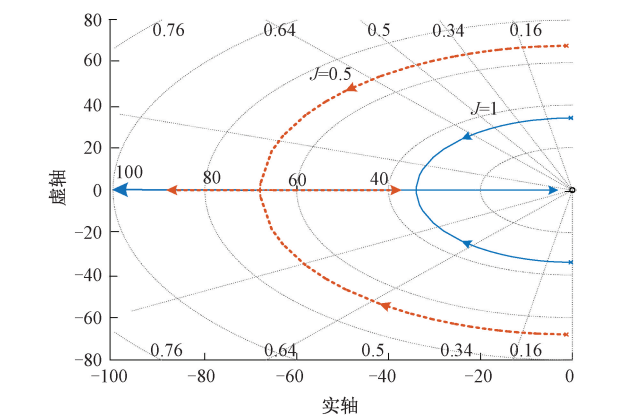


图 14 传递函数 $G_{p-D}(s)$ 根轨迹图
Fig. 14 Root locus diagram of transfer function $G_{p-D}(s)$

4 仿真实验及对比分析

4.1 仿真实验

为验证本文所提策略的可行性与有效性,在 MATLAB/Simulink 仿真环境下构建如图 1 所示的微电网有功功率仿真模型,并将如图 4 和 8 所示的控制策略应用于 VSG 控制模块中进行仿真测试。系统主要仿真参数如表 1 所示。

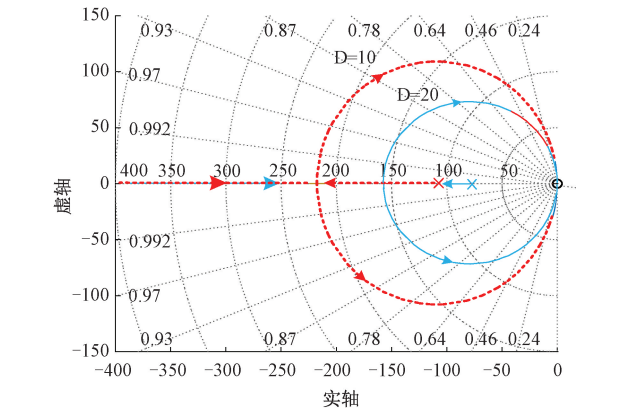


图 15 传递函数 $G_{p-J}(s)$ 根轨迹图
Fig. 15 Root locus diagram of transfer function $G_{p-J}(s)$

表 1 主要仿真参数	
Table 1 Main simulation parameters	
参数	数值
有功功率给定值 P_{ref}/kW	50
直流侧电压 U_{dc}/V	800
VSG 电压给定值 U_{ref}/V	220
额定频率 f_{ref}/Hz	50
滤波电感 $L_f/\mu\text{H}$	500
滤波电容 $C_f/\mu\text{F}$	100
虚拟转动惯量初始值 $J_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$	0.13
阻尼系数初始值 $D_0/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1})$	10.14

当仿真模型处于离网运行状态时,初始时刻带负载 50 kW 运行在额定状态,在 0.6 与 1.2 s 时分别投入 10 和 25 kW 的有功功率波动 (如图 16 所示) 分别模拟两种负荷扰动模式。图中实线表示投切常规负荷扰动,虚线表示投切动态变化负荷扰动。然后使用所提策略对微电网频率进行调节,仿真结果如图 17 所示。

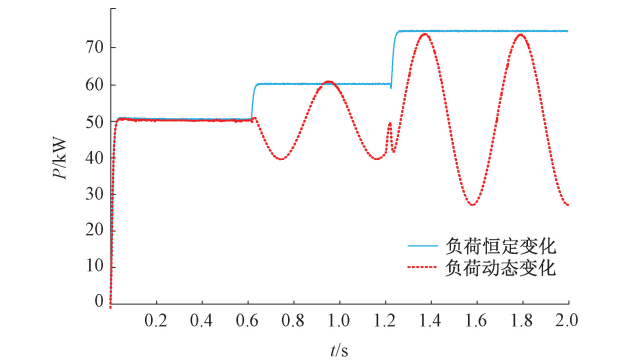


图 16 微电网有功功率波动图
Fig. 16 Fluctuation diagram of active power in microgrid

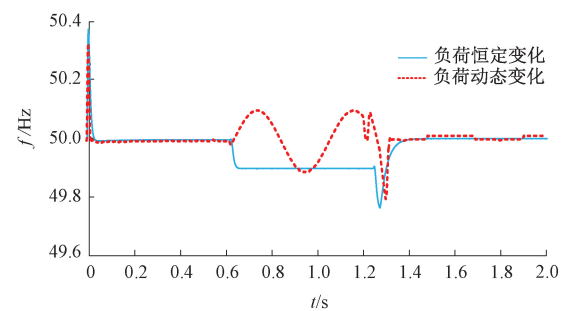


图 17 所提策略仿真结果

Fig. 17 Simulation results of the proposed strategy

仿真结果表明,所提策略能够根据调频阈值 f_{set} 在二次调频之间切换;当微电网需要进行频率二次调节时,能够利用负荷功率特征数据准确辨识负荷扰动模式;在负荷动态变化场景中,所提策略能够实现对微电网频率的跟踪调节。仿真结果验证了所提策略的可行性与有效性。

4.2 对比分析

在定义两种负荷扰动模式中,分别将所提策略与下垂控制、VSG 一次调频策略、基于 PI 控制器的传统 VSG 二次调频策略进行对比分析。在对比实验中,本文所提调频策略的基础参数继承了其他对比策略的最优基础参数,这保证对比实验中各个算法均处于最佳动态性能。具体地,下垂控制的基础参数中有功频率偏差反馈系数 k_p 的取值为 15 923,无功电压下垂系数 k_q 的取值为 0.001。VSG 一次调频策略是在下垂控制的基础上引入阻尼系数 D 与虚拟转动惯量 J 模拟传统旋转电机转子运动方程;其中,阻尼系数 D_0 的取值为 10.14 N·m·s/rad,虚拟转动惯量 J_0 的取值为 0.13 kg/m²。传统 VSG 二次调频策略是在一次调频策略的基础上,采用将积分器引入到 VSG 功频控制环路,与阻尼系数组成 PI 控制器的方法,实现微电网频率调节;其中,积分系数 k_i 的取值为 300。本文所提策略是在传统 VSG 二次调频策略的基础上,利用负荷功率特征数据辨识负荷扰动模式,采用自适应调整 VSG 参数和虚拟调速器结构的方法,实现频率调节;其中,虚拟转动惯量 J 自适应调整范围为[0.13, 0.84],阻尼系数 D 自适应调整范围为[10.14, 25.36]。具体测试结果与分析如下。

1) 投切常规负荷扰动模式测试

假设初始时刻 VSG 运行在额定状态,带负载 50 kW。在微电网运行过程中,采用如图 16 内实线所示的有功功率变化模拟微电网投切常规负荷扰动情况;分别采用下垂控制、VSG 一次调频策略、基于 PI 控制器的传统 VSG 二次调频策略和所提策略进行频率调节,仿真结果如图 18 所示。

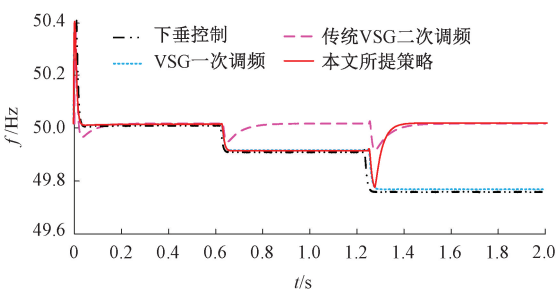


图 18 投切常规负荷扰动时的仿真结果

Fig. 18 Simulation results when switching the disturbance of conventional loads

当 VSG 处于额定运行状态时,系统频率保持在 50 Hz;当微电网投切常规负荷扰动时,频率调节开始,且各调频策略在频率调节过程中存在差异。将频率偏移量 Δf 作为表示各调频策之间差异的调频指标后如表 2 所示。当微电网投切常规负荷扰动时,由于控制策略中没有引入虚拟惯量 J ,下垂控制策略的频率波动速度在 4 种策略中最快,不利于电网稳定运行,且在微电网需要二次调频时,存在 0.223 1 Hz 的频率偏移。由于虚拟惯量 J 与阻尼系数 D 的引入,VSG 一次调频策略、基于 PI 控制器的传统 VSG 二次调频策略和所提策略频率在波动时速率降低,在一定程度上抑制了频率波动。但 VSG 一次调频策略与下垂控制类似,在微电网需要二次调频时,存在 0.210 9 Hz 的频率偏移,为有差调节;基于 PI 控制器的传统 VSG 二次调频策略在微电网需要二次调频时,可以实现频率的无差调节,但调频之间不存在控制回路使得一二次调频之间相互耦合;所提策略在频率控制环节设置一二次调频阈值 f_{set} 解决了传统 VSG 二次调频策略调频之间的耦合问题,在减小频率波动速度与频率偏移量方面均具有更好的调节性能。

表 2 投切常规负荷扰动时调频指标

Table 2 Index table of frequency regulation when switching the disturbance of conventional loads

	下垂控制	VSG 一 次调频	传统 VSG 二次调频	所提策略
一次频率偏移量/Hz	0.085 9	0.085 4	0	0.085 6
二次频率偏移量/Hz	0.223 1	0.210 9	0	0

2) 投切动态变化负荷扰动模式测试

针对负荷动态变化场景,假设初始时刻 VSG 运行在额定状态,带负载 50 kW。采用如图 16 内虚线所示的有功功率变化模拟微电网投切动态变化负荷扰动情况;采用下垂控制、VSG 一次调频策略、基于 PI 控制器的传统 VSG 二次调频策略和所提调频策略进行频率调节,仿真结果如图 19 所示。

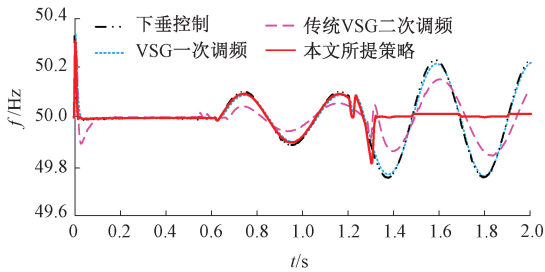


图 19 投切动态变化负荷扰动时的仿真结果

Fig. 19 Simulation results when switching the disturbance of dynamic loads

将各调频策略调频过程中的差异转化为调频指标后如表 3 所示。在负荷动态变化场景中,下垂控制策略的频率波动速度在 4 种策略中惯性最小,受负荷扰动影响最明显,且在微电网需要二次调频时,频率偏移量在 $[0,0.239\ 4]$ Hz 范围内随着负荷扰动进行变化。虚拟惯量 J 与阻尼系数 D 的引入使得其他调频策略频率波动速度减小,但 VSG 一次调频策略与下垂控制类似,在微电网需要二次调频时,存在频率偏移量在 $[0,0.233\ 6]$ Hz 范围内随着负荷扰动变化的问题,为有差调节;频率偏差持续变化引发的积分器不断累加,导致传统 VSG 二次调频策略在微电网需要二次调频时频率偏移量在 $[0,0.154\ 3]$ Hz 范围内持续变化,调频效果不佳;所提策略在考虑负荷动态变化的情况下,采用根据频率偏移量自适应调整 VSG 参数与调速器结构的策略实施对微电网频率的跟踪调节。将微电网二次频率波动范围限制在 0.017 3 Hz 以内,在减小频率偏移量方面更具优势,增强了孤岛微电网运行时的频率稳定性与抗干扰性。

表 3 投切动态变化负荷扰动时调频指标

Table 3 Index table of frequency regulation when switching the disturbance of dynastic loads

	下垂控制	VSG 一次 调频	传统 VSG 二次调频	所提 策略
一次频率偏移量/Hz	[0,0.086 8]	[0,0.084 4]	[0,0.034 5]	[0,0.086 4]
二次频率偏移量/Hz	[0,0.239 4]	[0,0.233 6]	[0,0.154 3]	[0,0.017 3]

5 结 论

本文提出了考虑负荷动态变化的孤岛微电网二次频率控制策略。具体地,分析了负荷扰动常规变化与动态变化的差异,利用负荷功率特征数据对负荷扰动模式进行辨识;针对负荷扰动动态变化模式,设计了自适应调整 VSG 参数与调速器结构的方案,实现了该模式下微电网频率的跟踪调节,克服了传统 VSG 二次调频策略在负荷

动态变化时积分器不断累加导致频率振荡的问题。

仿真测试结果表明,所提策略能够减小微电网在负荷动态变化场景中的频率波动速度与偏移量;相比于几种已有的调频策略,增强了孤岛微电网的频率稳定性与抗干扰性。限于研究时限,尚无真型电网实验结果及应用案例,后续将探究所提控制策略在实际微电网系统中的适用性和可靠性。

参考文献

[1] 程启明,沈章平,程尹曼,等. 基于虚拟同步发电机和无源性控制的 DFIG 机侧控制策略[J]. 电子测量与仪器学报,2023,37(3):141-151.

CHENG Q M, SHEN ZH P, CHENG Y M, et al. Virtual synchronous generator and PBC based cascaded control for DFIG rotor side converter[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37 (3): 141-151.

[2] 马志豪,朱焜秋. 逆变器驱动式磁轴承关键技术研究发展综述[J]. 中国电机工程学报,2023,43(19):7649-7659.

MA ZH H, ZHU H Q. Review on research and development of key technology of inverter driven magnetic bearing[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43 (19): 7649-7659.

[3] 张赞宁,孙想亮,付文龙,等. 参数协调模糊自适应 VSG 控制策略[J]. 电子测量技术,2022,45(21):1-7.

ZHANG Y N, SUN X L, FU W L, et al. Parameter coordination fuzzy adaptive VSG control strategy [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45 (21): 1-7.

[4] 程雪坤,刘辉,田云峰,等. 基于虚拟同步控制的双馈风电并网系统暂态功角稳定研究综述与展望[J]. 电网技术,2021,45(2):518-525.

CHENG X K, LIU H, TIAN Y F, et al. Transient power angle stability of doubly-fed wind power grid-connected systems based on virtual synchronous control is reviewed and expected [J]. Power System Technology, 2021, 45 (2): 518-525.

[5] 王继磊,张兴,朱乔华,等. 虚拟同步发电机暂态稳定性分析与控制策略[J]. 电机与控制学报,2022,26(12):28-37.

WANG J L, ZHANG X, ZHU Q H, et al. Transient stability analysis and control strategy of virtual synchronous generator [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26 (12): 28-37.

[6] 孙伟,方昭,杨建平,等. 考虑随机时变延时的孤岛微电网分布式二次控制[J]. 中国电机工程学报,2022,42(3):864-876.

- SUN W, FANG ZH, YANG J P, et al. Distributed secondary control of isolated island microgrid considering random time-varying delay[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 864-876.
- [7] 金石, 梁帅, 施隆. 不平衡电网下无刷双馈风电系统的虚拟同步发电机控制[J]. 电网技术, 2023, 20(10): 1-11.
- JIN SH, LIANG SH, SHI L. Virtual synchronous generator control for brush less doubly-fed wind power system in unbalanced power grid[J]. Power System Technology, 2023, 20(10): 1-11.
- [8] HU J, SHAN Y, CHENG K W, et al. Overview of power converter control in microgrid challenges, advances, and future trends[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(8): 9907-9922.
- [9] 王开让, 赵一名, 孟建辉, 等. 基于自适应模型预测控制的光储虚拟同步机平滑并网策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 831-839.
- WANG K R, ZHAO Y M, MENG J H, et al. Smooth grid-connection strategy for photovoltaic storage virtual synchronous generator based on adaptive model predictive control[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 831-839.
- [10] 张宇华, 赵晓轲, 方艺翔. 独立微网中虚拟同步发电机的频率自恢复控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(6): 2125-2131.
- ZHANG Y H, ZHAO X K, FANG Y X. Frequency self-recovery control strategy of virtual synchronous generator in independent microgrid[J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 2125-2131.
- [11] AMBIA M N, KMENG W, XIAO A, et al. Interactive grid synchronization-based virtual synchronous generator control scheme on weak grid integration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(5): 4057-4071.
- [12] 曹坤, 艾永乐, 李港星. 基于内模控制的逆变器并网无缝切换策略研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(23): 19-24.
- CAO K, AI Y L, LI G X. Research on seamless switching strategy of inverter between grid connected and off-grid based on internal model control[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(23): 19-24.
- [13] 倪泽龙, 林钰钧, 王治涛, 等. 基于模型预测的虚拟同步机控制储能调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 85-93.
- NI Z L, LIN Y J, WANG ZH T, et al. Research on frequency modulation of virtual synchronous controlled energy storage based on model prediction[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 85-93.
- [14] LU L Y, CHU C. Consensus-based secondary frequency and voltage droop control of virtual synchronous generators for isolated AC microgrids[J]. IEEE Journal on Emerging & Selected Topics in Circuits & Systems, 2015(3): 443-455.
- [15] YAO J, YU W, GAO W, et al. Frequency regulation control strategy for PMSG wind-power generation system with flywheel energy storage unit[J]. In IET Renewable Power Generation, 2017, 11(8): 1082-1093.
- [16] 马良玉, 王月, 马进. 基于PI参数的二阶线性自抗扰控制参数整定[J/OL]. 控制工程, 2023, 1-8 [2023-10-30]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20220220>.
- MA L Y, WANG Y, MA J. Second order linear active disturbance rejection control parameter tuning based on PI parameter[J/OL]. Control Engineering of China, 2023, 1-8 [2023-10-30]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20220220>.
- [17] LIU C, WANG X, REN Y, et al. A novel distributed secondary control of heterogeneous virtual synchronous generators via event-triggered communication[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(6): 4174-4189.
- [18] 孙亮, 杨晓飞, 孙立国, 等. 基于改进虚拟同步发电机的多逆变器频率无差控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 18-27.
- SUN L, YANG X F, SUN L G, et al. Frequency free control strategy of multiple inverters based on improved virtual synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 18-27.
- [19] 侯龙, 王玉爽, 杨沛豪. 采用新型MPC提高储能PCS虚拟同步机控制稳定性研究[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(7): 82-88.
- HOU L, WANG Y SH, YANG P H, et al. Research on using new MPC to improve control stability of energy storage PCS virtual synchronous machine[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(7): 82-88.
- [20] 杨向真, 杨秋强, 杜燕, 等. 采用自适应在线模型辨识的微电网二次调频策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(20): 121-130.
- YANG X ZH, YANG Q Q, DU Y, et al. Secondary frequency modulation strategy of microgrid based on adaptive online model identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(20): 121-130.
- [21] 张福东, 朴政国, 郭裕祺, 等. VSG转动惯量的自适应控制策略[J]. 太阳能学报, 2020, 41(10): 93-100.
- ZHANG F D, PU ZH G, GUO Y Q, et al. Adaptive control

- strategy of VSG moment of inertia [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2020, 41(10): 93-100.
- [22] 王淋, 巨云涛, 吴文传, 等. 面向频率稳定提升的虚拟同步化微电网惯量阻尼参数优化设计[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(13): 4479-4490.
- WANG L, JU Y T, WU W CH, et al. Optimal design of inertia and damping parameters of virtual synchronous microgrid for improving the stability of frequency [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(13): 4479-4490.
- [23] LONG B, LIAO Y, CHONGK T J, et al. Enhancement of frequency regulation in AC microgrid: A fuzzy MPC controlled virtual synchronous generator [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(4): 3138-3149.
- [24] 郑伟杰, 周扬忠, 钟天云, 等. 基于扩充虚拟矢量的永磁同步电动机模型预测直接转矩控制[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(7): 296-304.
- ZHENG W J, ZHOU Y ZH, ZHONG T Y, et al. Model predictive instantaneous torque control of permanent magnet synchronous motor based on finite voltage set optimization[J]. *Chinese Journal Scientific Instrument*, 2023, 44(7): 296-304.

作者简介



Liu Penghui (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Henan Polytechnic University in 2014, Ph. D. degree from Hunan University in 2019, respectively. Now he is a lecturer and M. Sc. supervisor in Henan Polytechnic University. His main research interests include the protection and control of new energy micro. His main research interest is smart grid.



郑克影, 2022 年于河南师范大学获得学士学位, 现为河南理工大学硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行控制与优化。E-mail: 3215113556@qq.com

Zheng Keying received her B. Sc. degree from Henan Normal University in 2022. Now she is a M. Sc. candidate at Henan Polytechnic University. Her main research interests include the control and optimization of power system operation.

刘鹏辉 (通信作者), 2014 年于河南理工大学获得学士学位, 2019 年于湖南大学获得博士学位, 现为河南理工大学讲师、硕士生导师, 主要研究方向为新能源微网及智能电网的保护与控制。

E-mail: penghuiliu@foxmail.com