DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.6.123 **中图分类号**：TM464 **文献标志码**：A

虚拟同步发电机并网逆变器微分平坦控制策略

李子阳(中国电源学会会员)，王洪希，王 璞，王永琛
(北华大学电气与信息工程学院，吉林 132000)

摘要：为解决基于虚拟同步发电机VSG(virtual synchronous generator)控制的逆变器并网时电压、电流双闭环传统控制动态响应速度慢、鲁棒性差的问题，提出一种基于微分平坦理论的VSG新型双闭环控制策略。首先，根据三相并网逆变器拓扑结构建立*dq*坐标轴下的数学模型，并根据微分平坦理论证明了系统的平坦性；其次，设计了包括前馈参考轨迹和误差反馈补偿的电压和电流微分平坦控制器；最后，在MATLAB/Simulink中搭建了系统仿真模型。仿真结果表明，在功率扰动和电网三相短路的工况下，所提控制策略提高了基于VSG的并网逆变器的动态响应速度和鲁棒性，验证了VSG应用微分平坦控制策略的有效性和可行性。

关键词：虚拟同步发电机；微分平坦；动态性能；鲁棒性

Differential Flatness Control Strategy for Grid-connected Inverter Based on Virtual Synchronous Generator Control

LI Ziyang, *Member, CPSS*, WANG Hongxi, WANG Pu, WANG Yongchen
(College of Electrical and Information Engineering, Beihua University, Jilin 132000, China)

Abstract: To solve the problems of slow dynamic response speed and poor robustness in the conventional voltage and current dual-closed-loop control for grid-connected inverters based on virtual synchronous generator (VSG) control, a novel dual-closed-loop control strategy for VSG based on the differential flatness theory was proposed. First, a mathematical model under the *dq* coordinate axis was established according to the topology of a three-phase grid-connected inverter, and the flatness of the system was proved based on the differential flatness theory. Second, a voltage and current differential flatness controller including feedforward reference locus and error feedback compensation was designed. Finally, a simulation model of the system was constructed in MATLAB/Simulink. Simulation results show that the proposed control strategy improves the dynamic response speed and robustness of the VSG-based grid-connected inverter under the operating conditions of power disturbance and three-phase short-circuit fault of the grid, thereby verifying the effectiveness and feasibility of the differential flatness control strategy when it is applied to VSG.

Keywords: Virtual synchronous generator (VSG); differential flatness; dynamic property; robustness

收稿日期：2023-02-06；**修回日期**：2023-04-17；**录用日期**：2023-07-27；**网络首发日期**：2023-08-04
基金项目：吉林省教育厅科学技术研究资助项目(JJKH20230063KJ)；北华大学研究生创新计划资助项目(2022045)
This work is supported by Science and Technology Research Project of Education Department of Jilin Province under the grant JJKH20230063KJ; Graduate Student Innovation Program of Beihua University under the grant 2022045

随着能源危机和环境污染问题的日益严重，风能、太阳能等分布式发电高比例接入电网。大量分布式发电接入会导致电力系统的惯性和阻尼下降，影响电力系统的稳定性[1-3]。为此，国内外学者提出虚拟同步发电机VSG(virtual synchronous generator)控制，该控制模拟了同步发电机SG(synchronous generator)的转子运动方程和电气方程，使并网逆变器不仅具有传统发电机一次调频和一次

调压的能力，而且能为电力系统提供惯性和阻尼[4-7]。随着以新能源为主体的新型电力系统的发展，研究基于 VSG 的逆变器先进控制策略具有重要意义。

文献[8]提出了同步逆变器的概念，同步逆变器在数学和物理模型上与电压型 VSG 等效，通过模拟 SG 的外特性，实现了逆变器交流侧输出电压、频率与电网的自同步；文献[9]利用重复控制稳态精度高和比例-积分动态性能好的特点，将 2 种控制结合，改善了并网逆变器的动态性能，但这 2 种控制之间存在耦合，控制较为复杂；文献[10]建立并网和孤岛下的逆变器小信号模型，通过分析控制参数提高逆变器的动态性能和系统稳定性，但若想持续保持系统的高动态性能，需要不断对控制参数进行寻优计算，计算量较大；文献[11]提出了一种惯性和阻尼自适应的 VSG 控制策略，分析了调差系数与虚拟惯量、阻尼对系统动态性能的影响，缩短了系统暂态过程，提高了系统输出的响应速度，但并未研究电网强度对自适应控制的影响；文献[12]提出了一种基于电网自适应的 VSG 控制策略，考虑在不同电网强度下的自适应控制，保证在不同的电网强度下均有较好的动态性能；文献[13]在已有 VSG 模型预测控制的基础上，考虑了模型预测控制对频率偏移和频率变化率的影响，通过改进模型预测控制对 VSG 的功率缺额进行补偿，使系统频率的动态特性得到提高。上述并网逆变器大部分采用的电压电流双闭环比例积分 PI(proportional integral)控制，控制结构简单且易于实现，但在强耦合、高精度的环境下，有较大的局限性，并引起相位滞后，从而影响控制性能。

文献[14]提出了一种新型的 VSG 的电压、电流双闭环控制，将自抗扰和重复控制结合作为电压外环的控制方式，利用自抗扰控制的抗干扰能力强和重复控制跟踪精度高的优点，提高了逆变器并网的动态响应速度和抗扰动能力；文献[15]将以前馈为主导的微分平坦控制替换传统电压电流双闭环的 PI 控制，缩短了暂态调节时间，加快了动态响应速度，增强了系统鲁棒性，但若用于分布式发电的并网，则系统仍缺少惯性和阻尼，系统的稳定性将受到威胁。

综上，本文提出一种新型的 VSG 电压、电流双闭环控制策略，利用微分平坦控制 DFC(differential flatness control)具有动态响应快、鲁棒性强的优点，将 VSG 并网逆变器的电压、电流双闭环 PI 控制采用微分平坦控制代替，在电网发生扰动时，既能满足分布式发电系统并网所需的惯性和阻尼，又能加快系统的动态响应速度，提高系统的鲁棒性，仿真实验验证所提控制策略的有效性和优越性。

1 VSG 的数学模型

VSG 逆变器的主电路及控制结构如图 1 所示。图中：U_{dc} 为分布式电源等效的直流电压；e_a、e_b、e_c 为 VSG 的三相虚拟电动势；R、L、C 分别为逆变器的滤波电阻、滤波电感和滤波电容；U_{abc}、i_{abc} 分别为交流侧的并网电压和并网电流；L_g 为理想电网的电感；U_{ga}、U_{gb}、U_{gc} 为理想电网的三相电压。VSG 的等效模型如图 2 所示。

为方便分析，本文以极对数为 1 的三相隐极式同步发电机(机械角速度与电气角速度相等)为研究对象，并忽略铁心磁饱和和涡流的影响[16]。VSG 的有功-频率控制由转子运动方程和下垂特性方程组成，其中转子运动方程为

$$\begin{cases} J\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=T_{\mathrm{m}}-T_{\mathrm{e}}-T_{\mathrm{d}}=\dfrac{P_{\mathrm{m}}}{\omega_0}-\dfrac{P_{\mathrm{e}}}{\omega_0}-D(\omega-\omega_0) \\ \dfrac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}=\omega \end{cases} \tag{1}$$

式中：J 为 VSG 的虚拟转动惯量；D 为阻尼转矩对应的阻尼系数；T_{m}、T_{e}、T_{d} 分别为 SG 的机械转矩、电磁转矩和阻尼转矩；ω、ω_0 分别为逆变器的输出角速度和电网额定角速度；P_{m}、P_{e} 分别为 VSG 额定输入的机械功率和实际有功功率的输出值；θ 为转子运动的角度。

VSG输出的瞬时有功功率 P_{e} 和无功功率 Q_{e} 分别为

$$\begin{cases} P_{\mathrm{e}}=1.5(u_d i_d+u_q i_q) \\ Q_{\mathrm{e}}=1.5(u_q i_d-u_d i_q) \end{cases} \tag{2}$$

式中，u_d、i_d和 u_q、i_q为 u_{abc}、i_{abc}经坐标变换后 d 轴和 q 轴的输出电压、输出电流。

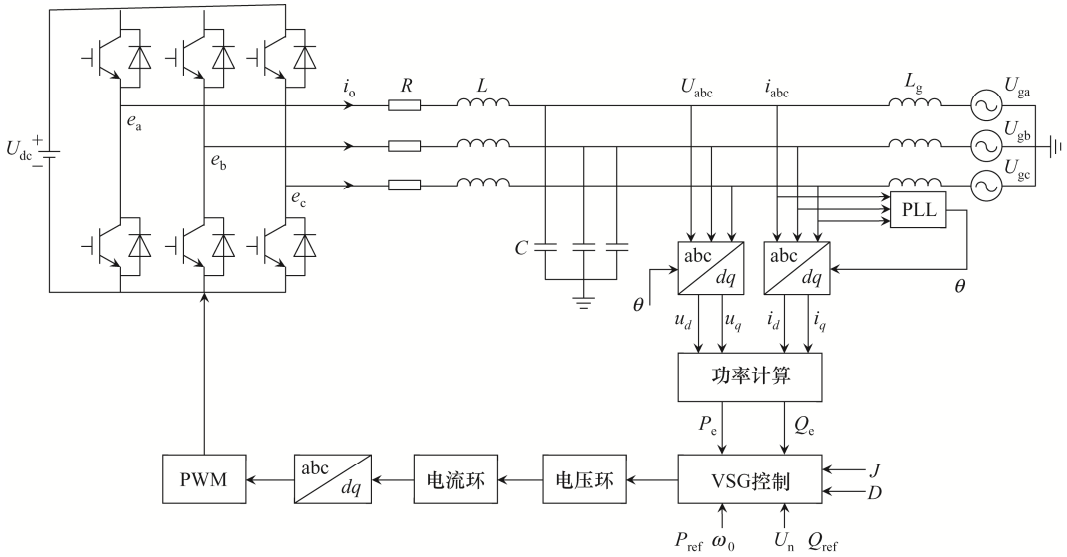


图 1　三相并网逆变器的 VSG 控制

Fig. 1 VSG control of three-phase grid-connected inverter

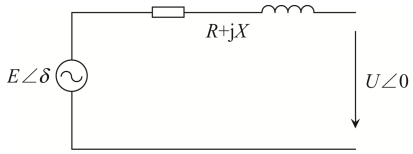


图 2　同步发电机等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of synchronous generator

有功下垂特性方程为

$$P_m = P_{ref} - k_p(\omega - \omega_0) \tag{3}$$

式中，P_{ref}、k_p分别为 VSG 有功功率的参考值、有功-频率的下垂系数。

VSG 的无功-电压控制由下垂控制和励磁调节控制组成，VSG 模拟同步发电机的励磁系统，根据系统反馈的无功功率调节励磁电流的大小改变输出的端电压，无功-电压控制方程可表示为

$$Q_{ref} - k_q(U - U_0) - Q_e = KsE_m \tag{4}$$

式中：Q_{ref}为 VSG 无功功率的参考值；k_q为无功-电压的下垂系数；K为微分系数；U、U_0、E_m分别为输出电压、额定电压和虚拟电动势的幅值。

图 3 为 VSG 有功-频率和无功-电压的控制框图。图中，VSG 模拟 SG 控制原动机的机械转矩来调节有功功率，并获得转子的运动角度 θ；同时 VSG 通过改变励磁来调节机端电压，最后合成 VSG 的虚拟电动势 E，即

$$E = \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_m \sin\theta \\ E_m \sin(\theta - 2\pi/3) \\ E_m \sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \tag{5}$$

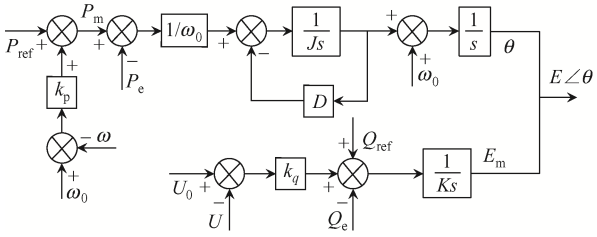


图 3　VSG 的有功-频率及无功-电压控制框图

Fig. 3 Block diagram of active-frequency and reactive-voltage control of VSG

2　微分平坦理论及平坦性证明

2.1　微分平坦原理

20 世纪 90 年代，为满足非线性控制需要，Fliess 等[17]提出了微分平坦控制。存在一个非线性系统

$$\dot{\boldsymbol{x}} = f(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}) \qquad \boldsymbol{x} \in \mathbf{R}^n, \boldsymbol{u} \in \mathbf{R}^m \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{x}$为系统的状态变量；$\boldsymbol{u}$为系统的输入变量。若存在非线性输出

$$\dot{\boldsymbol{y}} = g(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}, \dot{\boldsymbol{u}}, \ddot{\boldsymbol{u}}, \cdots, u^{(k)}) \qquad \boldsymbol{y} \in \mathbf{R}^m \tag{7}$$

式中，$\boldsymbol{y}$ 为系统的输出。使得状态变量和输入变量同时满足

$$\boldsymbol{x}=\boldsymbol{x}(\boldsymbol{y},\dot{\boldsymbol{y}},\ddot{\boldsymbol{y}},\cdots,y^{(i)}) \tag{8}$$

$$\boldsymbol{u}=\boldsymbol{u}(\boldsymbol{y},\dot{\boldsymbol{y}},\ddot{\boldsymbol{y}},\cdots,y^{(j)}) \tag{9}$$

即非线性系统的状态变量和输入变量均可由系统的输出变量及有限阶微分所表示，则这一非线性系统为微分平坦系统，该输出是系统的平坦性输出。需要注意的是，系统输出 $\boldsymbol{y}$ 的选取不唯一，可根据实际情况选取。国内外微分平坦控制的应用大量集中于物体运动如机器人、飞行器、无人驾驶汽车[18]的轨迹规划。近年来，随着电力行业的发展，微分平坦控制逐步应用到分布式电源、换流器[19]等电力装置中。微分平坦系统控制框图如图 4 所示。

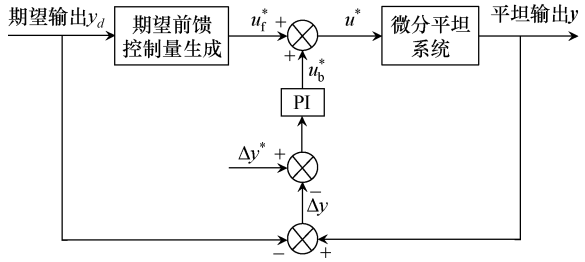


图 4 微分平坦系统控制框图

Fig. 4 Control block diagram of differential flatness system

图 4 中，微分平坦控制根据系统参考轨迹状态变量生成期望前馈控制量 u_{f}^*，通过对期望误差 Δy^* 与实际误差 Δy 由 PI 产生系统的误差补偿量 u_{b}^*。由于参考轨迹生成的前馈控制是微分平坦控制的主导部分，动态误差反馈补偿作为系统的校正部分，微分平坦控制相对于其他线性控制器动态性能更好，鲁棒性更强。

2.2 三相逆变器平坦性证明

三相并网逆变器在三相静止坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} e_{\mathrm{a}}=u_{\mathrm{a}}+Ri_{\mathrm{a}}+L\dfrac{\mathrm{d}i_{\mathrm{a}}}{\mathrm{d}t} \\ e_{\mathrm{b}}=u_{\mathrm{b}}+Ri_{\mathrm{b}}+L\dfrac{\mathrm{d}i_{\mathrm{b}}}{\mathrm{d}t} \\ e_{\mathrm{c}}=u_{\mathrm{c}}+Ri_{\mathrm{c}}+L\dfrac{\mathrm{d}i_{\mathrm{c}}}{\mathrm{d}t} \end{cases} \tag{10}$$

经过 park 变换，得到同步旋转坐标系下三相并网逆变器的数学模型为

$$\begin{cases} u_d=e_d-Ri_d-L\dfrac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t}+\omega Li_q \\ u_q=e_q-Ri_q-L\dfrac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t}-\omega Li_d \end{cases} \tag{11}$$

取系统的状态变量为 $\boldsymbol{x}=[i_d \quad i_q]^{\mathrm{T}}$，输入变量为 $\boldsymbol{u}=[u_d \quad u_q]^{\mathrm{T}}$，输出 $\boldsymbol{y}=[y_1 \quad y_2]^{\mathrm{T}}=[i_d \quad i_q]^{\mathrm{T}}$，则

$$\boldsymbol{x}=\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}=\phi(y_1,y_2) \tag{12}$$

$$\boldsymbol{u}=\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} e_d-Ry_1-L\dot{y}_1+\omega Ly_2 \\ e_q-Ry_2-L\dot{y}_2-\omega Ly_1 \end{bmatrix}=\varphi(y_1,y_2) \tag{13}$$

式(12)和式(13)表明，当选取 $\boldsymbol{x}=[i_d \quad i_q]^{\mathrm{T}}$、$\boldsymbol{u}=[u_d \quad u_q]^{\mathrm{T}}$、$\boldsymbol{y}=[i_d \quad i_q]^{\mathrm{T}}$ 时，$\boldsymbol{x}$ 和 $\boldsymbol{u}$ 均可由逆变器输出 $\boldsymbol{y}$ 及各阶有限微分表示，则可以将微分平坦理论应用到三相逆变器的控制研究中。

3 电压、电流微分平坦控制器设计

由图 2 可得 VSG 输出电流 I_{o} 的计算公式为

$$I_{\mathrm{o}}=\frac{E\angle\delta-U}{R+\mathrm{j}X} \tag{14}$$

式中，δ 为同步发电机的功角，$\delta=\int(\omega-\omega_0)\mathrm{d}t$。由于 $X\gg R$，故 R 在计算中可以忽略不计。

将电压 U 的矢量方向固定在 d 轴上，即 $U_d=U$、$U_q=0$，VSG 的输出电流可以表示为

$$\begin{cases} I_{od}=\dfrac{E_d-U}{X} \\ I_{oq}=\dfrac{E_q}{X} \end{cases} \tag{15}$$

微分平坦控制中，期望前馈轨迹生成是控制的主导部分，根据式(15)可得，外环控制器前馈参考输出为

$$\begin{cases} i_{d,\mathrm{f}}^*=\dfrac{E_d^*-U_d}{X}-C\dfrac{\mathrm{d}U_d}{\mathrm{d}t} \\ i_{q,\mathrm{f}}^*=\dfrac{E_q^*}{X}-C\dfrac{\mathrm{d}U_q}{\mathrm{d}t} \end{cases} \tag{16}$$

式中：$i_{d,\mathrm{f}}^*$、$i_{q,\mathrm{f}}^*$ 为外环控制器 d、q 轴的参考前馈输出量；E_d^*、E_q^* 分别为 VSG 所得出 d、q 轴的虚拟电动势。

若系统不存在功率扰动，则前馈控制就可以较好地跟踪理想值，但因电网中不确定因素较多，故引入误差反馈环节，使得输出电流更好地跟踪目标值。令 $\Delta E_d = E_d^* - E_d$，$\Delta E_d^* = 0$，可以得到外环输出电流的补偿值 $i_{d,\mathrm{b}}^*$、$i_{q,\mathrm{b}}^*$ 分别为

$$\begin{cases} i_{d,\mathrm{b}}^* = (k_{\mathrm{pe}} + \dfrac{k_{\mathrm{ie}}}{s})(\Delta E_d^* - \Delta E_d) \\ i_{q,\mathrm{b}}^* = (k_{\mathrm{pe}} + \dfrac{k_{\mathrm{ie}}}{s})(\Delta E_q^* - \Delta E_q) \end{cases} \tag{17}$$

式中，k_{pe}、k_{ie} 为电压外环误差反馈环节的控制参数。

微分平坦外环输出量的参考轨迹为

$$\begin{cases} i_d^* = i_{d,\mathrm{f}}^* + i_{d,\mathrm{b}}^* \\ i_q^* = i_{q,\mathrm{f}}^* + i_{q,\mathrm{b}}^* \end{cases} \tag{18}$$

根据式(11)可以得出，微分平坦内环控制的参考前馈的电压输出为

$$\begin{cases} u_{d,\mathrm{f}}^* = e_d - Ri_d^* - L\dfrac{\mathrm{d}i_d^*}{\mathrm{d}t} + \omega L i_q^* \\ u_{q,\mathrm{f}}^* = e_q - Ri_q^* - L\dfrac{\mathrm{d}i_q^*}{\mathrm{d}t} - \omega L i_d^* \end{cases} \tag{19}$$

式中，$u_{d,\mathrm{f}}^*$、$u_{q,\mathrm{f}}^*$ 为电流内环前馈参考轨迹的电压输出量。

令 $\Delta i_d = i_d^* - i_d$，$\Delta i_q = i_q^* - i_q$，$\Delta i_d^* = 0$，$\Delta i_q^* = 0$，则电流内环的误差反馈补偿模型为

$$\begin{cases} \Delta u_{dl} = -R\Delta i_d - L\dfrac{\mathrm{d}\Delta i_d}{\mathrm{d}t} + \omega L\Delta i_q \\ \Delta u_{ql} = -R\Delta i_q - L\dfrac{\mathrm{d}\Delta i_q}{\mathrm{d}t} - \omega L\Delta i_d \end{cases} \tag{20}$$

根据式(20)可得，电流内环反馈补偿量的输出值 $u_{d,\mathrm{b}}^*$、$u_{q,\mathrm{b}}^*$ 为

$$\begin{cases} u_{d,\mathrm{b}}^* = (k_{\mathrm{pu}} + \dfrac{k_{\mathrm{iu}}}{s})(\Delta i_d^* - \Delta i_d) + \omega L i_q^* \\ u_{q,\mathrm{b}}^* = (k_{\mathrm{pu}} + \dfrac{k_{\mathrm{iu}}}{s})(\Delta i_q^* - \Delta i_q) - \omega L i_d^* \end{cases} \tag{21}$$

式中，k_{pu}、k_{iu} 为内环误差反馈环节的控制参数。

通过内环的参考前馈和误差反馈补偿后，微分平坦内环控制器的模型为

$$\begin{cases} u_d^* = u_{d,\mathrm{f}}^* + u_{d,\mathrm{b}}^* \\ u_q^* = u_{q,\mathrm{f}}^* + u_{q,\mathrm{b}}^* \end{cases} \tag{22}$$

通过对电压环、电流环平坦控制器的设计，基于 VSG 的电压、电流双闭环微分平坦控制框图如图 5 所示。

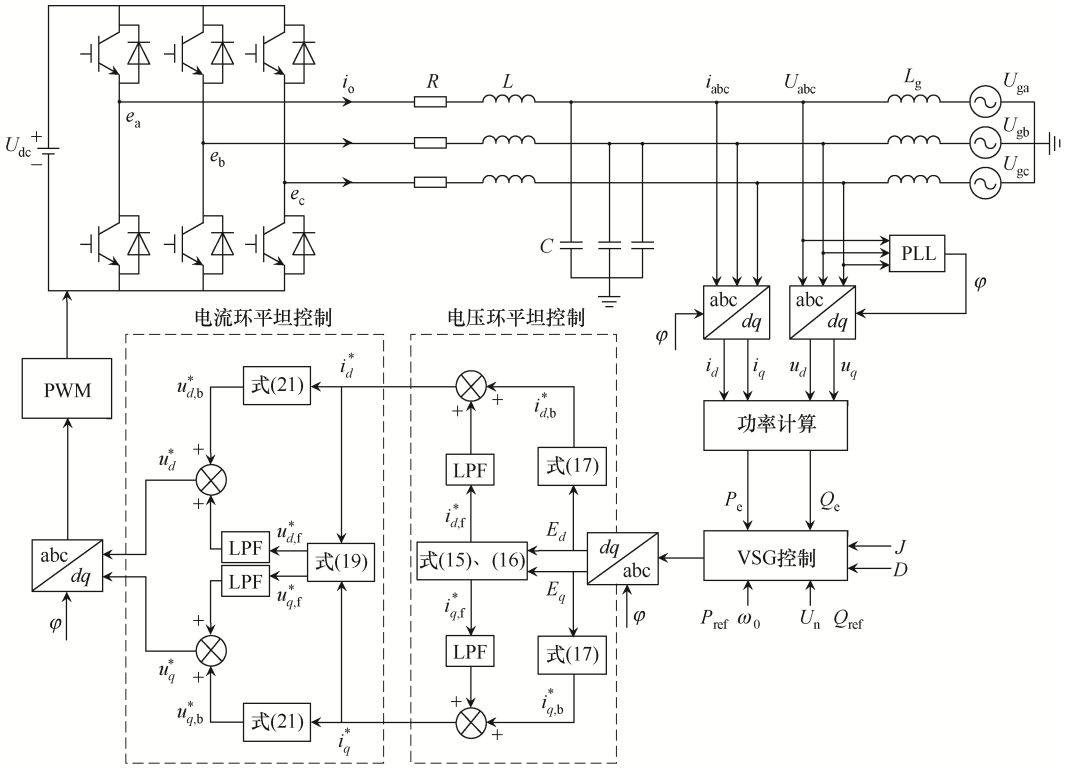


图 5　基于 VSG 的电压、电流双闭环微分平坦控制框图

Fig. 5 Block diagram of VSG-based voltage and current dual-closed-loop differential flatness control

4 仿真验证

为验证应用微分平坦控制策略的有效性和先进性，在 MATLAB/Simulink 中搭建基于 VSG 的电压、电流双闭环传统 PI 控制(VSG_PI)和基于 VSG 的电压、电流双闭环微分平坦控制(VSG_DFC)的三相逆变器并网模型，仿真参数见表 1，并分别在功率扰动和三相短路故障 2 种工况下进行仿真分析。

表 1 主要仿真参数

Tab. 1 Main simulation parameters

系统参数	数值	系统参数	数值
直流侧电压/V	800	滤波电容/μF	20
额定频率/Hz	50	滤波电阻/Ω	0.2
滤波电感/mH	5	转动惯量/ (kg·m^2)	0.3
交流侧三相电压有效值/V	220	阻尼参数/(W·s·rad^{-1})	10
		开关频率/kHz	10

4.1 功率扰动下逆变器并网分析

为验证 VSG_DFC 的控制性能，在 1.0 s 时改变 2 种控制方式 VSG_PI 和 VSG_DFC 的功率参考值，设置功率扰动 P_{ref} 由 10 kW 跃变到 8 kW，Q_{ref} 保持 0 kvar 不变。

逆变器并网启动时对电网会有短暂冲击，产生冲击电流，VSG 控制的虚拟惯性抑制了 VSG_PI 和 VSG_DFC 产生较大的冲击电流，二者分别在 0.60、0.30 s 达到稳态。1.00 s 时受到功率扰动，2 种控制方式在功率突变时的电网电流如图 6 所示，电网电流经过 0.40、0.20 s 的波动后又恢复稳态。2 种控制方式的有功功率、频率如图 7 和图 8 所示。

逆变器在并网启动和并网受到功率扰动时的频率动态响应参数见表 2 和表 3。表中：Δf_1 为 VSG 逆变器并网启动时频率波动范围；σ_1 为 VSG 逆变器并网启动动态超调量；t_1 为 VSG 逆变器并网启动动态响应时间；Δf_2 为 VSG 逆变器并网受到功率扰动时频率波动范围；σ_2 为 VSG 逆变器并网受到功率扰动的动态超调量；t_2 为VSG逆变器并网受到

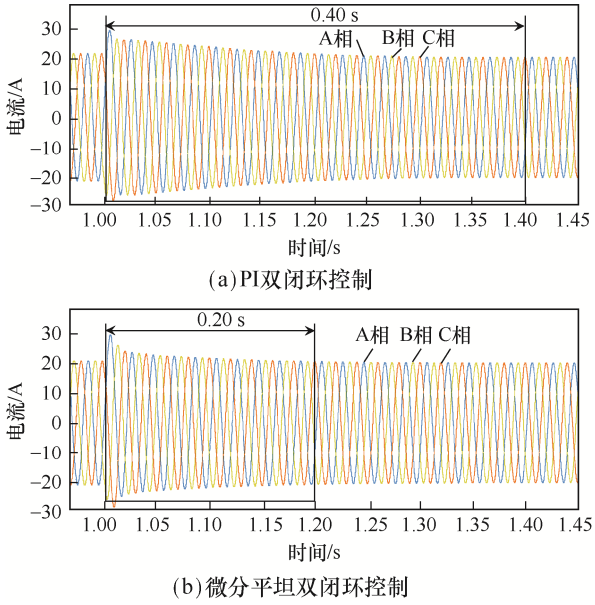


图 6 2 种控制方式在功率突变时的电网电流

Fig. 6 Grid current under two control methods when power changes suddenly

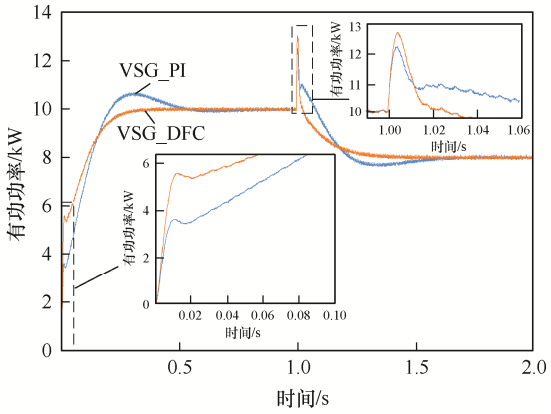


图 7 2 种控制方式的有功功率

Fig. 7 Active power under two control methods

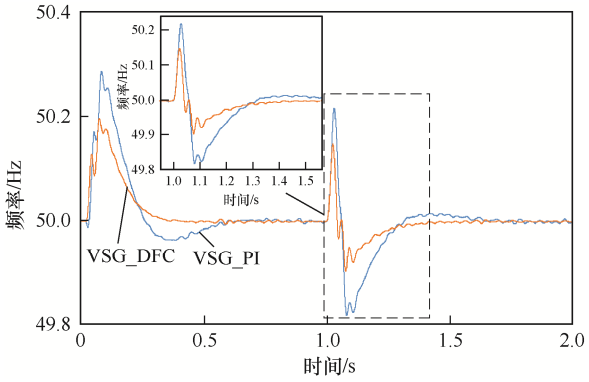


图 8 2 种控制方式的频率

Fig. 8 Frequency under two control methods

表 2　逆变器并网启动时频率动态响应参数

Tab. 2 Frequency dynamic response parameters during grid-connected start-up of inverter

控制策略	Δf_1/Hz	σ_1/%	t_1/s
VSG_PI	49.98~50.30	0.6	0.6
VSG_DFC	50.00~50.20	0.4	0.3

表 3　逆变器并网受到功率扰动时频率动态响应参数

Tab. 3 Frequency dynamic response parameters of grid-connected inverter subjected to power disturbances

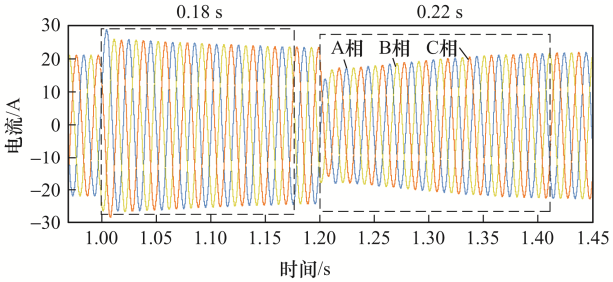
控制策略	Δf_2/Hz	σ_2/%	t_2/s
VSG_PI	49.82~50.22	0.44	0.6
VSG_DFC	49.91~50.14	0.28	0.3

功率扰动的动态响应时间。

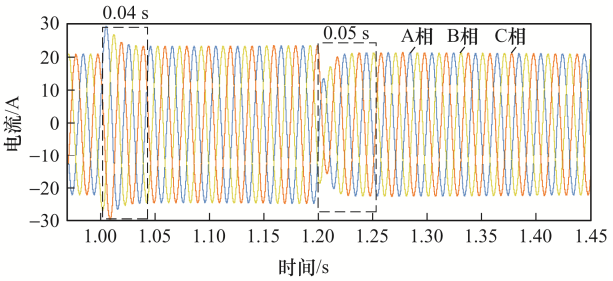
由图 7、图 8 和表 2、表 3 可知，逆变器并网启动时，相比于 VSG_PI 控制，VSG_DFC 对有功功率参考值的跟踪较快，超调量从 VSG_PI 控制的 0.6%下降到 VSG_DFC 的 0.4%，频率动态响应时间缩短；逆变器并网受到功率扰动时，相比于 VSG_PI 控制，VSG_DFC 检测并网补偿功率缺额的速度较快，有功功率的超调量随之增大，暂态过程中，VSG_DFC 的有功功率和频率先达到稳定，频率的超调量比 VSG_PI 控制低 0.16%。综上所述，VSG_DFC 在逆变器并网启动和受到功率扰动时，其鲁棒性和动态响应速度均优于 VSG_PI 控制。

4.2　三相短路下逆变器并网分析

为模拟真实电网三相短路故障，1.00 s 时设置电网电压跌落 20%，1.20 s 时切除故障，本文只讨论三相对称故障。2 种控制方式在电网电压骤降时的电网电流如图 9 所示，在电网电压跌落时的无功功率、频率跟踪对比如图 10 和图 11 所示。逆变器并网受到三相短路时频率动态响应参数见表 4。



(a)PI双闭环控制



(b)微分平坦双闭环控制

图 9　2 种控制方式在电网电压骤降时的电网电流

Fig. 9 Grid current under two control methods in the case of grid voltage dips

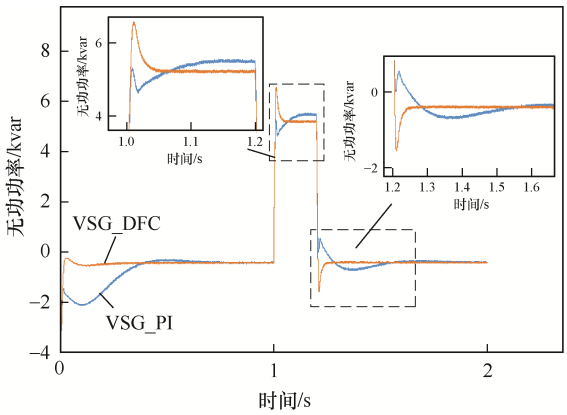


图 10　电网电压跌落时 2 种控制的无功功率跟踪对比

Fig. 10 Comparison of reactive power tracking between two control methods in the case of grid voltage dips

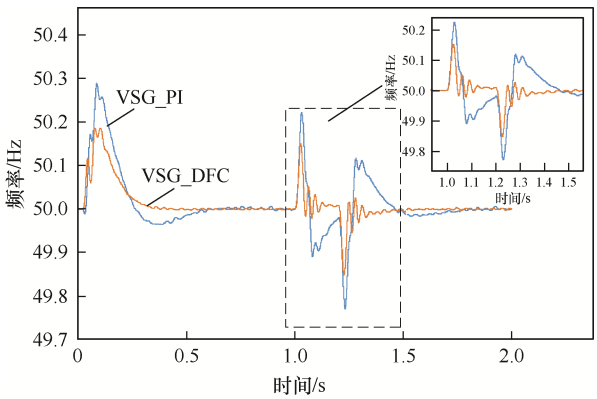


图 11　电网电压跌落时 2 种控制的频率跟踪对比

Fig. 11 Comparison of frequency tracking between two control methods in the case of grid voltage dips

由图 9 可见，当 1.00 s 发生三相短路故障时，与 VSG_PI 控制相比，VSG_DFC 暂态恢复时间更短；当 1.20 s 故障切除时，电网电流短暂波动，VSG_PI 控制和 VSG_DFC 分别经过 0.22 s 和 0.05 s 达到稳态。由图 10、图 11、表 4 可知，当逆变器并网在

表 4 逆变器并网受到三相短路时频率动态响应参数

Tab. 4 Frequency dynamic response parameters of grid-connected inverter under three-phase short-circuit fault

控制策略	Δf/Hz	σ/%	t/s
VSG_PI	49.77~50.22	0.46	0.35
VSG_DFC	49.85~50.15	0.30	0.15

1.0 s 发生三相短路时，相比于 VSG_PI 控制，VSG_DFC 的频率动态响应时间变短，抗扰性能更好，但因需要无功功率补偿电网三相短路造成的电压骤降，故无功功率会有短暂的功率超调。暂态过程中，VSG_DFC 的无功功率和频率率先达到稳定，且频率的超调量低于 VSG_PI 控制超调量的 0.16%。综上所述，电网遭受三相短路故障时，VSG_DFC 的动态响应速度和鲁棒性明显优于 VSG_PI 控制。

5 结语

针对基于 VSG 的电压电流双闭环 PI 控制在分布式发电并网时动态性能不足、鲁棒性弱的问题，本文结合微分平坦动态响应快和鲁棒性强的优点，将微分平坦与 VSG 相结合，提出了一种基于 VSG 的新型电压电流双闭环控制策略，设计了包括前馈参考轨迹和误差反馈补偿的电压和电流微分平坦控制器，实现对系统目标指令的快速跟踪和反馈，改善系统频率和电压稳定性问题。在 MATLAB 中搭建功率扰动和三相短路时 2 种工况的仿真模型，相比于电压电流双闭环传统 PI 控制，本文控制策略的动态响应速度提高、鲁棒性增强，验证了所提控制策略的正确性和有效性。

参考文献：

[1] 兰征, 杨淳智, 谭仁煜, 等. 考虑异构分布式光伏电压治理潜力的配电网集群式优化调控方法[J]. 电源学报, 2025, 23(3): 196-207.
Lan Zheng, Yang Chunzhi, Tan Renyu, et al. Optimal regulation method for distribution network clustering considering voltage governance potential of heterogeneous distributed photovoltaics [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(3): 196-207. (in Chinese)

[2] 易桂平, 胡仁杰. 分布式电源接入电网的电能质量问题研究综述[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(1): 38-46.
Yi Guiping, Hu Renjie. Survey on the power quality question resultant from connection of distributed power generation to the grid [J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(1): 38-46. (in Chinese)

[3] 王莹, 肖峻, 曹严. 柔性配电网间歇性分布式发电消纳能力分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(13): 74-83.
Wang Ying, Xiao Jun, Cao Yan. Analysis on accommodation capability of intermittent distributed generation in flexible distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(13): 74-83. (in Chinese)

[4] 刘欣, 郭志博, 贾焦心, 等. 基于序阻抗的虚拟同步发电机并网稳定性分析及虚拟阻抗设计[J]. 电工技术学报, 2023, 38(15): 4130-4146.
Liu Xin, Guo Zhibo, Jia Jiaoxin, et al. Stability analysis and virtual impedance design of virtual synchronous machine based on sequence impedance [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(15): 4130-4146. (in Chinese)

[5] 邓鹏, 杨沛豪. 混合储能虚拟同步机频率优化调节研究[J]. 电源学报, 2025, 23(2): 142-151.
Deng Peng, Yang Peihao. Research on frequency optimal regulation of hybrid energy storage virtual synchronous generator [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(2): 142-151. (in Chinese)

[6] Visscher K, De Haan S W H. Virtual synchronous machines (VSG's) for frequency stabilisation in future grids with a significant share of decentralized generation [C]// CIRED Seminar 2008: SmartGrids for Distribution. Frankfurt, 2008: 1-4.

[7] 陈璐, 张溪, 党晓圆, 等. 采用新型模型预测的光伏虚拟同步机低电压穿越控制[J]. 电源学报, 2024, 22(4): 163-172.
Chen Lu, Zhang Xi, Dang Xiaoyuan, et al. Low-voltage ride-through control of photovoltaic virtual synchronous generator using novel model prediction [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(4): 163-172. (in Chinese)

[8] Zhong Qingchang, Weiss G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.

[9] 张兴, 汪杨俊, 余畅舟, 等. 采用 PI+重复控制的并网逆变器控制耦合机理及其抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5287-5295.
Zhang Xing, Wang Yangjun, Yu Changzhou, et al. Mech-

anism of the control coupling and suppression strategy using PI and repetitive control in grid-connected inverters [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5287-5295. (in Chinese)

[10] 孟建辉, 王毅, 石新春, 等. 基于虚拟同步发电机的分布式逆变电源控制策略及参数分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 1-10.
Meng Jianhui, Wang Yi, Shi Xinchun, et al. Control strategy and parameter analysis of distributed inverters based on VSG [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 1-10. (in Chinese)

[11] 杨赟, 梅飞, 张宸宇, 等. 虚拟同步发电机转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 125-131.
Yang Yun, Mei Fei, Zhang Chenyu, et al. Coordinated adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for virtual synchronous generator [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 125-131. (in Chinese)

[12] 张骞, 蔡旭, 李征, 等. 动态响应特性在线自寻优的储能虚拟同步控制策略[J]. 电源学报, 2020, 18(5): 148-156.
Zhang Qian, Cai Xu, Li Zheng, et al. Energy storage VSG control strategy based on online adaptive optimization of dynamic response characteristics [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(5): 148-156. (in Chinese)

[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 Zelong, Lin Yujun, Wang Zhitao, et al. Research on frequency regulation of VSG controlled energy storages based on model predictive control [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 85-93. (in Chinese)

[14] 吕聪, 何山, 王维庆, 等. 基于线性自抗扰与重复控制的虚拟同步发电机并网逆变器控制策略[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(36): 15460-15468.
Lü Cong, He Shan, Wang Weiqing, et al. Control strategy of virtual synchronous generator grid-connected inverter based on linear active disturbance rejection and repetitive control [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(36): 15460-15468. (in Chinese)

[15] 江金鱼, 黄磊. 三相并网逆变器微分平坦控制策略[J]. 电测与仪表, 2016, 53(7): 45-50.
Jiang Jinyu, Huang Lei. Control strategy of three-phase gird-connected inverter based on differential flatness [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(7): 45-50. (in Chinese)

[16] 葛胜升, 王鹏, 施凯. 基于二阶线性自抗扰的虚拟同步发电机二次调频控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(10): 81-88.
Ge Shengsheng, Wang Peng, Shi Kai. Secondary frequency modulation control of virtual synchronous generator based on second-order linear active disturbance rejection control [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(10): 81-88. (in Chinese)

[17] Fliess M, Lévine J, Martin P, et al. Flatness and defect of non-linear systems: Introductory theory and examples [J]. International Journal of Control, 1995, 61(6): 1327-1361.

[18] 白成盼, 惠飞, 景首才. 基于微分平坦与 MPC 的智能车换道控制算法[J]. 计算机技术与发展, 2020, 30(5): 16-20.
Bai Chengpan, Hui Fei, Jing Shoucai. Intelligent car lane change control algorithm based on differential flatness and MPC [J]. Computer Technology and Development, 2020, 30(5): 16-20. (in Chinese)

[19] 蒲天骄, 张昭, 于汀, 等. 微分平坦理论及其在自动发电控制中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(12): 21-27.
Pu Tianjiao, Zhang Zhao, Yu Ting, et al. Differential flatness based control and its application in automatic generation control system [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(12): 21-27. (in Chinese)



李子阳

作者简介：

李子阳(1998—)，男，中国电源学会会员，硕士研究生。研究方向：电力电子与电力传动。E-mail：2773007889@qq.com。

王洪希(1971—)，男，通信作者，博士，教授。研究方向：电力电子及电力传动。E-mail：wang_hongxi71@163.com。

王璞(1998—)，女，硕士研究生。研究方向：电力电子与电力传动。E-mail：wangpu0607@163.com。

王永琛(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：电力电子与电力传动。E-mail：1300567404@qq.com。

(责任编辑：陈国珍)