DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.9.108 **中图分类号**：TM76 **文献标志码**：A

基于自适应参数调节与模型预测控制结合的 VSG 调频策略

张世栋(中国电源学会学生会员)，李培强
(福建理工大学电子电气与物理学院，福州 350118)

摘要：虚拟同步发电机 VSG(virtual synchronous generator)通过模拟传统发电机的惯量特性，已成为解决新能源并网频率波动问题的有效手段。然而，在传统 VSG 方法中，转动惯量和阻尼系数通常固定，可能导致负载变化时出现频率偏差。为此，提出一种结合自适应参数调节与模型预测控制 MPC(model predictive control)的方法，旨在优化 VSG 的频率性能。通过分析 VSG 的小信号模型，提出了一种自适应调节策略以抑制频率波动。同时，采用 MPC 控制器对 VSG 的输入功率进行动态调整，以增强发电单元对功率需求变化的响应。仿真结果表明，所提方法有效提升了系统频率稳定性。

关键词：虚拟同步发电机；自适应参数调节；模型预测控制；系统频率特性

VSG Frequency Modulation Strategy Based on Adaptive Parameter Adjustment and Model Predictive Control

ZHANG Shidong, *Student Member, CPSS*, LI Peiqiang
(College of Electronic, Electrical Engineering and Physics, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Virtual synchronous generator (VSG) has become an effective means to solve the problem of grid-connected frequency fluctuation of new energy by simulating the inertia characteristics of traditional generators. However, in the traditional VSG method, the moment of inertia and damping coefficient are usually fixed, which may lead to frequency deviation when the load changes. Therefore, a method combining adaptive parameter adjustment and model predictive control (MPC) is proposed to optimize the frequency performance of VSG. By analyzing the small-signal model of VSG, an adaptive adjustment strategy is proposed to suppress frequency fluctuation. At the same time, MPC is used to dynamically adjust the input power of VSG to enhance the response of power generation units to the change of power demand. Simulation results show that the proposed method effectively improves the frequency stability of the system.

Keywords: Virtual synchronous generator; adaptive parameter adjustment; model predictive control; system frequency characteristics

分布式能源凭借其灵活性和可靠性，逐渐成为未来电力系统的关键组成部分[1-3]。随着对新能源并网变流器控制策略研究的不断深入，下垂控制因其高效的功率调节性能而被广泛应用[4-5]。然而，下垂控制在应对快速变化的功率需求时，缺乏足够的惯量支撑，导致系统的频率响应性能下降，可能影响电网的稳定性[6-8]。

为解决频率波动问题，有学者提出通过在变流器控制策略中模拟传统同步发电机的惯量和阻尼特性，即虚拟同步发电机 VSG (virtual synchronous generator)控制[9]，以增强系统惯性。然而，传统 VSG 控制方法在系统频率偏差或变化率过大时，

收稿日期：2024-12-17；**修回日期**：2025-02-25，2025-03-17；
录用日期：2025-04-06；**网络首发日期**：2025-05-16
基金项目：国家重点基础研究发展计划资助项目(973 计划)(2021YFB2601504)；国家自然科学基金资助项目(52377097)
This work is supported by National Basic Research Program (973 Program) under the grant 2021YFB2601504; National Natural Science Foundation of China under the grant 52377097

可能无法达到预期效果。常见的解决方案是自适应调节 VSG 的转动惯量 J 和阻尼系数 D。文献[10]通过角速度变化量调节下垂系数，结合自适应 J、D 协同控制，有效抑制了 VSG 并网时的频率变化；文献[11]则提出了一种构网型参数自适应调整方法，在惯量控制中引入双曲函数调节频率恢复速率，同时通过稳态/暂态阻尼切换环节调整阻尼，减少频率偏差并降低有功功率输出稳态误差；文献[12]提出基于径向基函数 RBF(radial basis function)的自适应动态阻尼补偿策略，通过解耦参数与频率关联的阻尼动态调节机制，使阻尼值跟随频率变化调整，有效提升了系统暂态稳定性。虽然自适应参数调节方法具备一定优势，但是其参数调节范围存在限制，这一限制使得该方法无法直接对功率缺口进行补偿。因此，当系统遭遇较大扰动时，基于此方法的频率响应会呈现出明显的局限性。

为更精准地补偿功率缺额，有学者开始在并网逆变器中应用模型预测控制 MPC(model predictive control)[13-15]，MPC 通过预测控制效果和调节控制输入，能够更迅速、稳定地追踪控制目标，进而改善系统的频率特性。文献[16]提出针对调频的控制目标，通过 MPC 优化储能 VSG 的有功输入，相比传统方法，显著改善了频率变化率；文献[17]提出的自适应模型预测控制 A-MPC(adapative-MPC)有效解决了光储 VSG 系统在并网与孤岛模式切换时的电压、电流冲击问题；文献[18]利用 MPC 实时补偿了频率偏差；文献[19]提出模糊 MPC 方法并分析了其可行性，表明其具备较好的频率响应性能。然而，现有的 MPC-VSG 方法仍存在一定局限性，具体来说，在 MPC-VSG 的状态空间模型中，状态变量的系数与 VSG 的 J 和 D 直接相关。通常在现有的模型中，MPC 通过滚动优化动态修正控制输入，但其预测模型仍依赖固定的 J、D 参数，导致所建立的预测方程形成定系数矩阵，当系统面临较大扰动时，预测模型会与实际系统偏差显著，MPC 的优化能力将因模型失配而受限，进而影响对 VSG 有功输入功率的修正效果。

针对上述 VSG 频率调节问题，本文提出了一种结合自适应参数调节与MPC的改进VSG控制方法。该方法以降低频率偏差和频率变化率为目标，制定了虚拟惯量和虚拟阻尼参数的自适应调节策略，输出结果记为 J^* 和 D^*。其次，在 MPC 中建立了 VSG 转子运动方程的状态空间模型，并求解了 VSG 额定输入功率的最优补偿量，将 J^* 和 D^* 输入到 MPC 控制器中，修正初始状态下的 VSG 转子运动方程，从而提升系统频率响应性能。

1　VSG 控制基本原理

VSG 的应用实际上是模拟了同步发电机 SG (synchronous generator)的惯性、阻尼等特征，使其具备一次调频的能力，这一特性使 VSG 能够在电力系统中更好地响应负载变化和频率波动，从而提升系统的稳定性。基于 VSG 控制逆变器的并网拓扑如图 1 所示。图中：U_{dc} 为直流电源；i_{abc} 与 u_{abc} 分别为逆变器输出电流与电压；L_f 与 C_f 分别为逆变器侧滤波电感与滤波电容；Z_g 为电网等值阻抗；U_g 为电网电压；E 与 θ 分别为 VSG 功率外环输出电压幅值与相位。

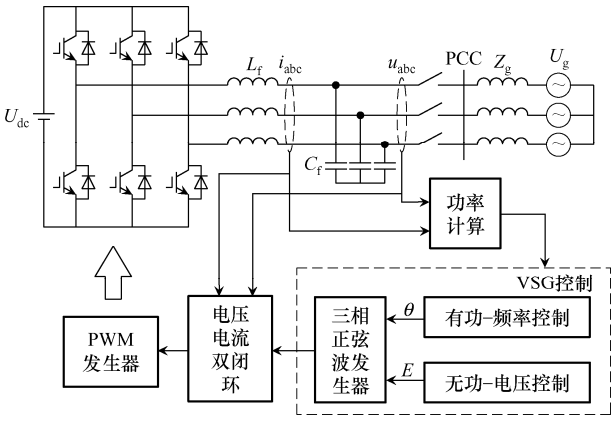


图 1　基于 VSG 的并网逆变器拓扑结构

Fig. 1 Topology of grid-connected inverter based on VSG

传统的同步发电机一般由二阶模型描述，假设同步发电机的级对数为 1，则等效成 VSG 的转子机械方程可表示为

$$J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=\frac{P_m}{\omega_0}-\frac{P_e}{\omega_0}-D(\omega-\omega_0) \tag{1}$$

式中：P_e 和 P_m 分别为 VSG 的电磁功率与机械功率；

ω 和 ω_0 分别为 VSG 输出角频率和额定角频率。

同时，VSG 为模拟同步发电机的一次调频特性，在其原有控制结构中加入有功-频率下垂控制环节，可表示为

$$P_{\mathrm{m}} = P_{\mathrm{ref}} + K_{\omega}(\omega_0 - \omega_{\mathrm{g}}) \tag{2}$$

式中：P_{ref} 为有功功率参考值；K_{ω} 为有功-频率控制下垂系数；ω_{g} 为角频率测量值。

无功-电压控制是通过 VSG 励磁调节器实现的，其无功-电压下垂控制方程为

$$E = E_{\mathrm{ref}} + K_Q(Q_{\mathrm{ref}} - Q_{\mathrm{e}}) \tag{3}$$

式中：E_{ref} 为端电压幅值额定值；K_Q 为无功-电压控制下垂系数；Q_{ref} 为无功功率参考值；Q_{e} 为无功功率测量值。

传统 VSG 控制框图如图 2 所示，其中 U 为电网电压幅值。

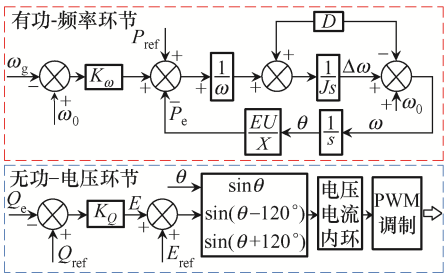


图 2 传统 VSG 控制框图

Fig. 2 Block diagram of traditional VSG control

根据图 2 所示的小信号模型，可得 VSG 有功环节的闭环传递函数为

$$G_P(s) = \frac{\Delta P_{\mathrm{e}}}{\Delta P_{\mathrm{ref}}} = \frac{K}{J\omega_0 s^2 + (D\omega_0 + K_{\omega})s + K} \tag{4}$$

式中，K 为同步电压系数，K=3EU/X，X 为线路等效阻抗。

根据自动控制原理，可进一步得到 VSG 有功输出动态响应过程的自然振荡角频率 ω_{n} 和阻尼比 ξ 分别为

$$\begin{cases} \omega_{\mathrm{n}} = \sqrt{\dfrac{K}{J\omega_0}} \\ \xi = \dfrac{D\omega_0 + K_{\omega}}{2\sqrt{J\omega_0 K}} \end{cases} \tag{5}$$

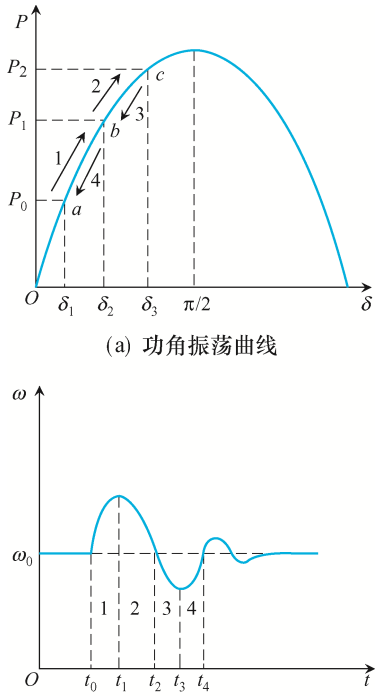
在式(4)所示的典型二阶传递函数中，为保证系统具有良好的动态调节性能，其阻尼比取值范围通常为 0.6≤ξ≤1.0。

在传统 VSG 控制策略中，J 和 D 通常在系统运行过程中保持不变。然而，当系统负载发生突变时，这种固定系数策略对频率波动的抑制能力有限，从而降低了系统频率响应的鲁棒性。相较之下，通过在系统运行过程中实时调整 VSG 的控制参数，在面对负载突变的情况下，VSG 会具备更优的频率调节性能[10]。

2 自适应参数 VSG 控制策略

2.1 惯量阻尼自适应调节算法

同步发电机功角和频率振荡曲线如图 3 所示，为便于分析，将振荡过程分为 4 个区间：[t_0, t_1)、[t_1, t_2)、[t_2, t_3)、[t_3, t_4]，分别对应图中 1、2、3、4 这 4 个过程。



(a) 功角振荡曲线

(b) 频率振荡曲线

图 3 同步发电机功角和频率振荡曲线

Fig. 3 Power angle and frequency oscillation curves of synchronous generator

在区间 1，由于有功功率突增，角频率变化量 $\Delta\omega$ 大于 0 且正向增加，角频率变化率 dω/dt 先突

增再逐渐减小，于 t_1 时刻减小为 0，系统频率偏移达到最大，由式(1)可知，应适当增加 J 和 D 来抑制 $\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t$ 和 $\Delta\omega$ 的变化；在区间 2，有功功率继续增大，$\Delta\omega$ 仍大于 0 但正向减小，$\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t$ 小于 0，因此，在此区间内应适当减小 J 且增加 D，加速角频率恢复至额定值；区间 3、区间 4 的参数制定原则同上述分析，不同区间 J 与 D 的选定规则见表 1。

表 1　不同区间内转动惯量与阻尼系数的选定原则

Tab. 1 Selection principles of moment of inertia and damping coefficients in different intervals

区间	$\Delta\omega$	$\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t$	$\Delta\omega\cdot\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t$	J	D
1	>0	>0	>0	增加	适当增加
2	>0	<0	<0	不变	适当增加
3	<0	<0	>0	增加	适当增加
4	<0	>0	<0	不变	适当增加

根据表 1 的原则以及 J、D 与 $\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t$、$\Delta\omega$ 之间的关系，可制定 VSG 自适应参数控制策略为

$$J=\begin{cases} J_0 & \Delta\omega\cdot(\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t)\leqslant 0\cup\left|\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t\right|\leqslant N_j \\ J_0+K_j\left|\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t\right| & \\ & \Delta\omega\cdot(\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t)>0\cap\left|\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t\right|>N_j \end{cases} \tag{6}$$

$$D=\begin{cases} D_0 & \left|\Delta\omega\right|\leqslant N_d \\ D_0+K_d\left|\Delta\omega\right| & \left|\Delta\omega\right|>N_d \end{cases} \tag{7}$$

式中：J_0 和 D_0 分别为 VSG 正常运行时的初始值；K_j 和 K_d 分别为 $\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t$ 和 $\Delta\omega$ 的调差系数；N_j 和 N_d 分别为 $\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t$ 和 $\Delta\omega$ 变化的阈值。

2.2 参数设计

2.2.1　J_0 和 D_0 的设计

初始惯量与阻尼系数的设定需兼顾系统动态特性与稳定性，重点考虑有功环节稳定裕度，因二阶系统幅值裕度恒满足要求，故仅需确保相位裕度 γ 处于 30°~80°；基于自动控制原理，闭环极点与虚轴距离越远，调节时间越短，故需约束闭环极点分布以优化动态响应；同时，根据 EN50438 标准，本文设定系统频率偏移量不超过 1 Hz，逆变器输出有功功率动态范围限定为额定容量的 40%~100%。综合上述约束条件，可建立参数设计关系为

$$\begin{cases} 30^\circ<\gamma=\arctan\left(2\gamma\sqrt{\dfrac{1}{\sqrt{4\gamma^4+1}-2\gamma^2}}\right)<80^\circ \\ R_e(s)=-\omega_0\xi\leqslant -10 \\ D=\dfrac{\Delta P}{\omega\Delta\omega_{\max}}\approx\dfrac{\Delta P}{\omega_0\Delta\omega_{\max}} \end{cases} \tag{8}$$

本文中，取 γ>70°，$\Delta\omega_{\max}=2\pi$，逆变器容量 ΔP 设定为 60 kVA。经计算，转动惯量最大值 $J_{\max}$ 为 0.62，阻尼系数最大值 $D_{\max}$ 为 25。

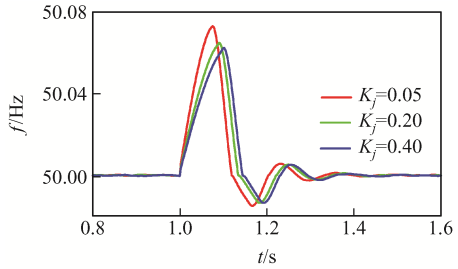
2.2.2　K_j 和 K_d 的设计

K_j 表示惯量 J 反应频率变化的能力，其取值大小直接影响系统的响应速度；阻尼系数 K_d 的取值直接决定阻尼 D 的频率偏差跟踪能力。由式(6)和式(7)可知，K_j 和 K_d 的最大取值可表示为

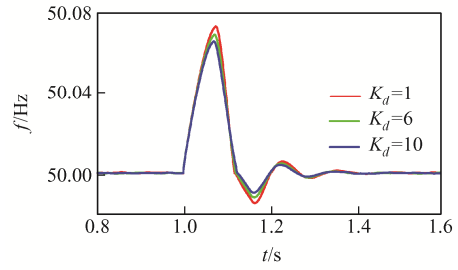
$$\begin{cases} K_{j\max}=\dfrac{J_{\max}-J_0}{\left|\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t\right|} \\ K_{d\max}=\dfrac{D_{\max}-D_0}{\left|\Delta\omega\right|} \end{cases} \tag{9}$$

本文中将角频率变化率绝对值$|\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t|$设置为 1 rad/s^2，角频率偏差绝对值$|\Delta\omega|$设为 0.2 rad/s。则可求得 $K_{j\max}$=0.42，$K_{d\max}$=10。在实际应用中，一般将控制系数控制在理论最大值的 80%以内。

图 4 为自适应参数策略作用下，K_j 和 K_d 变化



(a) K_j变化, K_d=1



(b) K_d变化, K_j=0.05

图 4　自适应系数变化时 VSG 频率响应波形图

Fig. 4 Waveforms of VSG frequency response when adaptive coefficients change

时 VSG 输出频率的波形对比。可以看出，当 K_d 固定，K_j 增大时，频率响应峰值时间变长，超调量减小，但 K_j 过大(超 0.2)会降低稳定裕度且效果不明显，故 K_j 取 0.2。当 K_j 固定，K_d 增大时，峰值时间变短，频率偏移下降，综合分析后 K_d 取 5。

阈值系数 N_j 和 N_d 用于防止小扰动引发自适应策略频繁启动，取值需依应用环境确定。本文中，为保持系统暂态稳定并与 MPC 控制器配合，调节 J 时，N_j 设为 0.4 rad/s；调节 D 时，N_d 设为 0.2 rad/s。

修正后的 J 和 D 可用于更新 VSG 的转子机械方程，由上述分析可知，较大的 J 和 D 可以在一定程度上减小系统的频率波动。但由式(1)可看出，影响 VSG 输出频率的因素除了 J 和 D 的取值外，还包括 P_m 和 P_e 的差值。因此，想要进一步优化系统的频率响应性能，还应将 VSG 输入功率 P_m 也进行实时修正，以弥补自适应参数调节方案的不足。

3 自适应参数调节与 MPC 结合的 VSG 控制策略

自适应参数调节-VSG 方法通过 2 个下垂控制器和可调转子运动方程模块控制电压和频率，但转动惯量和阻尼系数的调整范围有限，影响频率波动抑制效果。为此，本文引入 MPC 控制器，利用预测输出功率模型调整 VSG 的额定输入功率，以提升对频率振荡的抑制性能，图 5 为自适应参数调节-MPC-VSG 方法的框图。

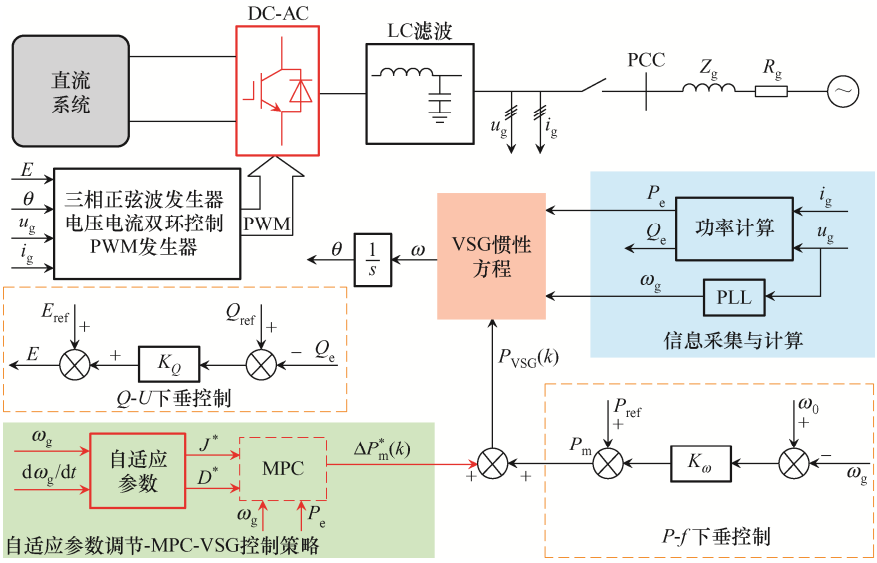


图 5 自适应参数调节-MPC-VSG 方法框图

Fig. 5 Block diagram of adaptive parameter adjustment MPC-VSG method

3.1 自适应参数调节与 MPC 结合的 VSG 控制方法

首先，需要建立自适应参数调节与 MPC 结合的 VSG 控制方法的数学模型，将第 2 节中经过自适应参数控制策略得到的转动惯量和阻尼系数值记为 J^*和 D^*，根据式(1)中 VSG 转子运动方程中给出的状态空间模型进行重写，可得

$$\begin{cases}\dot{\omega}(t)=\dfrac{-D^*}{J^*}\omega(t)+\dfrac{1}{J^*\omega_0}P_{\mathrm{m}}(t)-\dfrac{1}{J^*\omega_0}P_{\mathrm{e}}(t)\\ y(t)=\omega(t)\end{cases}\tag{10}$$

式中：$P_{\mathrm{m}}(t)$为 VSG 的输入功率，可作为可控输入变量；$P_{\mathrm{e}}(t)$为 VSG 的输出功率，可作为可观测的扰动变量；$y(t)$为 t 时刻 VSG 预测系统的输出变量。

由式(10)可导出离散模型为

$$\begin{cases}\Delta\omega(k+1)=\boldsymbol{A}\Delta\omega(k)+\boldsymbol{B}_{\mathrm{m}}\Delta P_{\mathrm{m}}(k)+\boldsymbol{B}_{\mathrm{e}}\Delta P_{\mathrm{e}}(k)\\ y(k)=\Delta\omega(k)\\ \boldsymbol{A}=\mathrm{e}^{-\frac{D^*}{J^*}T_{\mathrm{s}}}\\ \boldsymbol{B}_{\mathrm{m}}=\dfrac{1}{J^*\omega_0}\displaystyle\int_0^{T_{\mathrm{s}}}\mathrm{e}^{-\frac{D^*}{J^*}\tau}\mathrm{d}\tau\\ \boldsymbol{B}_{\mathrm{e}}=-\dfrac{1}{J^*\omega_0}\displaystyle\int_0^{T_{\mathrm{s}}}\mathrm{e}^{-\frac{D^*}{J^*}\tau}\mathrm{d}\tau\end{cases}\tag{11}$$

式中：T_s为控制周期；τ为时间常数。

为直接得到频率变化量Δf的值，选取 MPC 输出方程为$y(k+1)=\Delta\omega(k+1)$，当选取 3 步预测时，预测方程为

$$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{p,c}}(k+1\,|\,k)=\boldsymbol{S}_A\Delta\omega(k)+\boldsymbol{I}y(k)+\boldsymbol{S}_{\mathrm{e}}\Delta P_{\mathrm{e}}(k)+\boldsymbol{S}_{\mathrm{m}}\Delta P_{\mathrm{m}}(k) \tag{12}$$

式中：$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{p,c}}(k+1|k)$为第 k 时刻的三步 MPC 控制输出；$\boldsymbol{S}_A$、$\boldsymbol{S}_{\mathrm{e}}$、$\boldsymbol{S}_{\mathrm{m}}$、$\boldsymbol{I}$为系数矩阵，其表达式分别为

$$\begin{cases}\boldsymbol{S}_A=[\boldsymbol{A}\quad \boldsymbol{A}^2+\boldsymbol{A}\quad \boldsymbol{A}^3+\boldsymbol{A}^2+\boldsymbol{A}]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{S}_{\mathrm{e}}=[\boldsymbol{B}_{\mathrm{e}}\quad \boldsymbol{A}\boldsymbol{B}_{\mathrm{e}}+\boldsymbol{B}_{\mathrm{e}}\quad \boldsymbol{A}^2\boldsymbol{B}_{\mathrm{e}}+\boldsymbol{A}\boldsymbol{B}_{\mathrm{e}}+\boldsymbol{B}_{\mathrm{e}}]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{S}_{\mathrm{m}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{B}_{\mathrm{m}} & 0 & 0\\ \boldsymbol{A}\boldsymbol{B}_{\mathrm{m}}+\boldsymbol{B}_{\mathrm{m}} & \boldsymbol{B}_{\mathrm{m}} & 0\\ \boldsymbol{A}^2\boldsymbol{B}_{\mathrm{m}}+\boldsymbol{A}\boldsymbol{B}_{\mathrm{m}}+\boldsymbol{B}_{\mathrm{m}} & \boldsymbol{A}\boldsymbol{B}_{\mathrm{m}}+\boldsymbol{B}_{\mathrm{m}} & \boldsymbol{B}_{\mathrm{m}}\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{I}=[1\quad 1\quad 1]^{\mathrm{T}}\end{cases} \tag{13}$$

3.2 基于频率响应能力改善的代价函数设计

本文选择控制成本为关于频率偏差及 VSG 的额定功率变化量的函数，使其加权和达到最小，表达式为

$$J_p=\sum_1^3[(\alpha\Delta\omega(k+i\,|\,k))^2+(\beta\Delta P_{\mathrm{m}}(k+i\,|\,k))^2] \tag{14}$$

式中：α 与 β 分别为 VSG 输出频率变化值与输入功率变化值的权重系数；$\Delta\omega(k+i|k)$与 $\Delta P_{\mathrm{m}}(k+i|k)$分别为 k 时刻角频率偏差与有功功率偏差。

将式(14)转换成矩阵形式，则有

$$\begin{cases}J_p(\Delta\omega(k),\Delta P_{\mathrm{m}}(k))=\left\|\boldsymbol{\Gamma}_y(\boldsymbol{Y}_{\mathrm{p,c}}(k+1\,|\,k)-\boldsymbol{R}(k+1))\right\|^2+\left\|\boldsymbol{\Gamma}_{p\mathrm{m}}\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{m}}(k)\right\|^2\\ \boldsymbol{\Gamma}_y=\mathrm{diag}\{\alpha,\alpha,\alpha\},\ \boldsymbol{\Gamma}_{p\mathrm{m}}=\mathrm{diag}\{\beta,\beta,\beta\},\\ \boldsymbol{R}(k+1)=[0\quad 0\quad 0]^{\mathrm{T}}\\ \Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{m}}(k)=[\Delta P_{\mathrm{m}}(k)\quad \Delta P_{\mathrm{m}}(k+1)\quad \Delta P_{\mathrm{m}}(k+2)]^{\mathrm{T}}\end{cases} \tag{15}$$

受到约束条件的影响，将式(14)中的代价函数最小化而定义的优化问题通常无法直接求解。但在常用的解决手段中，可以将此优化问题转换为二次规划问题[20]，即将式(11)转化为 $\boldsymbol{z}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}\boldsymbol{z}-\boldsymbol{g}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{z}$ 的形式，$\boldsymbol{z}=\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{m}}(k)$则充当其自变量。

通过推导可得到式(15)中的代价函数表达式为

$$\begin{cases}J_p=\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{m}}(k)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{m}}(k)-\boldsymbol{G}(k+1\,|\,k)^{\mathrm{T}}\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{m}}(k)\\ \boldsymbol{H}=\boldsymbol{S}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}_y^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}_y\boldsymbol{S}_{\mathrm{m}}+\boldsymbol{\Gamma}_{p\mathrm{m}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}_{p\mathrm{m}},\boldsymbol{C}_{\mathrm{m}}=\left[-\boldsymbol{S}_{\mathrm{m}}\quad \boldsymbol{S}_{\mathrm{m}}\right]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{Q}_p(k+1\,|\,k)=\boldsymbol{R}(k+1)-\boldsymbol{S}_A\Delta\omega(k)-\boldsymbol{I}y(k)-\boldsymbol{S}_{\mathrm{e}}\Delta P_{\mathrm{e}}(k)\\ \boldsymbol{G}(k+1\,|\,k)=2\boldsymbol{S}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}_y^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}_y\boldsymbol{Q}_p(k+1\,|\,k)\end{cases} \tag{16}$$

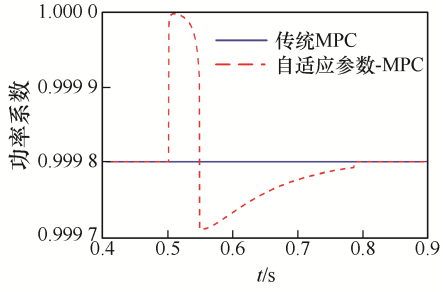
因频率波动应控制在一定范围内，则带有约束条件的 MPC 优化问题可描述为

$$\begin{cases}\min\limits_{\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{m}}(k)}\ J_p\\ \text{s.t.}\ \boldsymbol{C}_{\mathrm{m}}\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{m}}(k)=\boldsymbol{b}(k)=\begin{bmatrix}\boldsymbol{S}_A\Delta\omega(k)+\boldsymbol{I}y(k)+\boldsymbol{S}_{\mathrm{e}}\Delta P_{\mathrm{e}}(k)-\boldsymbol{Y}_{\max}(k+1)\\ \boldsymbol{S}_A\Delta\omega(k)+\boldsymbol{I}y(k)+\boldsymbol{S}_{\mathrm{e}}\Delta P_{\mathrm{e}}(k)+\boldsymbol{Y}_{\min}(k+1)\end{bmatrix}\end{cases} \tag{17}$$

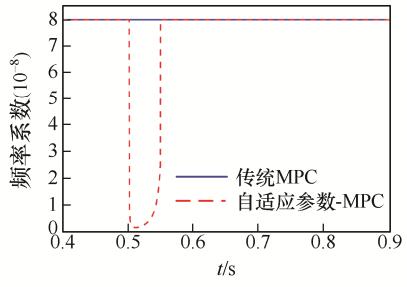
式中，$\boldsymbol{Y}_{\max}(k+1)$与 $\boldsymbol{Y}_{\min}(k+1)$为系统频率的时域约束。式(17)通过二次规划求解得到最优控制矩阵 $\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{m}}^*(k)$，其中第一个元素作为控制信号输入系统，因此 VSG 的参考输入功率可表示为

$$P_{\mathrm{VSG}}(k)=P_{\mathrm{m}}+\Delta P_{\mathrm{m}}^*(k) \tag{18}$$

图 6 为传统 MPC 方法与本文所提方法下，VSG 预测模型的功率系数与频率系数变化曲线的对比，



(a) 功率系数变化曲线



(b) 频率系数变化曲线

图 6　MPC 系数变化曲线

Fig. 6 Change curves of MPC coefficient

其中设定 J_0=0.2，D_0=8。可以看出，当系统受到扰动并启动自适应参数策略时，本文提出的方法相比传统 MPC-VSG 控制方法，能够实时修正 MPC-VSG 模型中的预测系数。这种修正使得控制器能够更快速地响应系统变化，并精准地补偿功率缺额 $\Delta P_{\mathrm{m}}^{*}(k)$。与传统方法相比，本文方法在调频过程中展现出更优越的动态响应能力，能够有效提高频率调节的精度和稳定性，优化了系统的整体调频效果。

3.3 自适应参数调节-MPC-VSG 控制方法分析

由于将所提控制方法引入到了 VSG 原有功控制环节中，因此需要保持系统的稳定，现对本文所提方法进行以下分析。

当式(17)的解在约束边界内时，所建立模型变为无约束模型，则代价函数可表示为

$$\begin{cases} J_p(\Delta\omega(k),\Delta P_{\mathrm{m}}(k))=\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\xi} \\ \boldsymbol{\xi}=\begin{bmatrix} \boldsymbol{\Gamma}_y(\boldsymbol{Y}_{\mathrm{p,e}}(k+1\,|\,k)-\boldsymbol{R}(k+1)) \\ \boldsymbol{\Gamma}_{p\mathrm{m}}\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{m}}(k) \end{bmatrix} \end{cases} \tag{19}$$

将预测方程式(12)代入式(19)中并进行求导化简可得到 k 时刻的最优解 $\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{m}}^{*}(k)$，则第一个元素 $\Delta P_{\mathrm{m}}^{*}(k)$ 可表示为

$$\begin{cases} \Delta P_{\mathrm{m}}^{*}(k)=\boldsymbol{K}_{\mathrm{MPC}}\boldsymbol{Q}_{\mathrm{p}}(k+1\,|\,k) \\ \boldsymbol{K}_{\mathrm{MPC}}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\end{bmatrix}\boldsymbol{H}^{-1}\boldsymbol{S}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}_y^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}_y \end{cases} \tag{20}$$

通过上述过程的描述，为方便分析所提控制策略对方程稳定性的影响，现将最优解 $\Delta P_{\mathrm{m}}^{*}(k)\approx K_{\mathrm{m}}\Delta P_{\mathrm{e}}$，$K_{\mathrm{m}}$ 定义为 MPC 作用下 VSG 的功率补偿系数，下面将具体分析 K_{m} 对系统稳定性影响。

式(1)中的传统 VSG 的转子运动方程经自适应参数调节后更新表达式为

$$J^{*}\omega_0\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=P_{\mathrm{ref}}-P_{\mathrm{e}}-(K_{\omega}+D^{*}\omega_0)(\omega-\omega_{\mathrm{g}}) \tag{21}$$

由于 VSG 输出功率 $P_{\mathrm{e}}=\dfrac{EU}{X}\sin\delta$，$U$ 为负载电压，δ 为 E、U 之间的功角。由于 E、U 之间角度差很小，即 $\Delta\delta=(\Delta\omega-\Delta\omega_{\mathrm{g}})/s$，因此其小信号模型可表示为

$$\Delta P_{\mathrm{e}}=\frac{EU}{X}\cos\delta\Delta\delta=K'(\Delta\omega-\Delta\omega_{\mathrm{g}})/s \tag{22}$$

式中，$K'=EU\cos\delta/X$。

进一步得到 VSG 输出功率与输出频率间的小信号模型为

$$J^{*}\omega_0\Delta\omega+D^{*}\omega_0(\Delta\omega-\Delta\omega_{\mathrm{g}})=\Delta P_{\mathrm{m}}^{*}-\Delta P_{\mathrm{e}}-K_{\omega}(\Delta\omega-\Delta\omega_{\mathrm{g}}) \tag{23}$$

将式(22)和式(23)结合，可得到 ΔP_{e} 与 $\Delta\omega$ 之间的传递函数为

$$G_{\omega}(s)=\frac{-J^{*}K\omega_0}{(D^{*}\omega_0+K_{\omega})s+1-K_{\mathrm{m}}} \tag{24}$$

由式(24)可以看出，当只考虑传统 VSG 有功控制环路对所提方法的影响时，通过分析得到的传递函数为典型一阶系统，存在唯一极点 $s=\dfrac{K_{\mathrm{m}}-1}{D^{*}\omega_0+K_{\omega}}$，由于极点表达式中分母部分恒大于 0，因此若满足系统稳定，需使得 VSG 补偿功率系数 K_{m}<1。

在得到 ΔP_{e} 与 $\Delta\omega$ 之间的传递函数后，由图 2 可知，还需要考虑电压、电流双环控制部分对功率补偿系数 K_{m} 的影响。引入电压电流双环后，系统的动态特性由多个环路的耦合关系共同决定，电压外环主要负责调节输出电压的幅值，其控制方式通常采用比例积分 PI(proportional integral)控制器，且其传递函数可表示为

$$G_u(s)=K_{\mathrm{p}u}+\frac{K_{\mathrm{i}u}}{s} \tag{25}$$

式中：$K_{\mathrm{p}u}$ 为电压环节的比例增益，主要用于快速响应电压偏差，调节动态过程中的电压波动；$K_{\mathrm{i}u}$ 为积分增益，用于消除稳态误差，确保输出电压精确跟踪参考值。

电流内环主要用来快速跟踪电流指令，传递函数一般为准比例谐振 PR(proportional resonant)控制，其传递函数可表示为

$$G_{\mathrm{c}}(s)=K_{\mathrm{p}i}+\frac{2K_{\mathrm{r}i}\omega_{\mathrm{c}}s}{s^2+2\omega_{\mathrm{c}}s+\omega_0^2} \tag{26}$$

式中：$K_{\mathrm{p}i}$ 为电流内环的比例增益，主要用于提高电流跟踪速度，抑制暂态误差；$K_{\mathrm{r}i}$ 为谐振增益，用于增强工频处谐波抑制能力；ω_{c} 为截止频率，决定电流环动态响应带宽。

将双环控制作为有功环的执行环节，系统级联传递函数为

$$G_{\mathrm{t}}(s)=G_{\omega}(s)\cdot G_{u}(s)\cdot G_{\mathrm{c}}(s)=\frac{-JK\omega_0(K_{pu}s+K_{iu})(K_{pi}s^2+2K_{ri}\omega_{\mathrm{c}}s)}{s\left[(D\omega_0+K_{\omega})s+1-K_{\mathrm{m}}\right](s^2+2\omega_{\mathrm{c}}s+\omega_0^2)} \tag{27}$$

通过式(27)可以看出，加入双环后需考虑其相位滞后对稳定性的影响，现具体分析其影响。

电流环传递函数包含一阶惯性环节，在截止频率 ω_{c} 处，电流环相位滞后约 90°；电压环主要形式为 PI 控制器，相位滞后约 45°，则引入双环后总相位滞后约 135°。而原条件 K_{m}<1 对应的相位裕度为

$$\varphi_{\mathrm{m}}=180^{\circ}-\arg G_{\omega}(\mathrm{j}\omega) \tag{28}$$

则加入双环后，总相位裕度减少为

$$\varphi_{\mathrm{n}}=\varphi_{\mathrm{m}}+135^{\circ} \tag{29}$$

为保证系统的稳定，通常要求 $\varphi_{\mathrm{n}}<45^{\circ}$，所以需降低 K_{m} 的上限，通过量化双环控制的动态特性，可得到修正后的稳定性条件为

$$K_{\mathrm{m}}^{*}<1-\frac{\eta(D\omega_0+K_{\omega})}{\omega_{\mathrm{c}}}-\lambda\frac{1}{T_{\mathrm{i}}\omega_{\mathrm{c}}} \tag{30}$$

式中：K_{m}^{*} 为修正后的功率补偿系数；η 为经验补偿系数，用以预留安全裕量，取值区间为(0.1, 0.3)，本文中取 0.2；λ 为引入的电压环相位补偿系数，避免低频段过度积分导致相位恶化，取值区间为(0.1, 0.3)，本文取 0.15；T_{i} 为电压环积分时间常数，$T_{\mathrm{i}}=K_{iu}/K_{pu}$。当截至频率 $\omega_{\mathrm{c}}=2\pi\cdot2\,000$ rad/s 时，可得到修正后的稳定条件需满足 $K_{\mathrm{m}}^{*}<0.72$。

为对比引入双环控制后所提修正方法的合理性，选择了 $K_{\mathrm{m}}^{*}=0.55$ 和 $K_{\mathrm{m}}^{*}=0.85$ 2 种情况，分别对系统的级联传递函数进行伯德图曲线对比分析，如图 7 所示。结果表明，K_{m}^{*} 取 0.85 时，即仅满足考虑有功环传递函数的稳定条件，对应传递函数的幅值裕度 h_1=3.2 dB，相位裕度 γ_1=11.5°；K_{m}^{*} 取 0.55 时，即满足考虑电压电流双环影响的修正后稳定条件，对应的幅值裕度 h_2 提升至 7.3 dB，相位裕度 γ_2 达到 28.2°。由此可见，结合双环控制后所引入的修正条件，不仅满足了系统的稳定性要求，而且相较于只考虑有功环稳定条件时，在一定程度上提升了系统的稳定裕度。

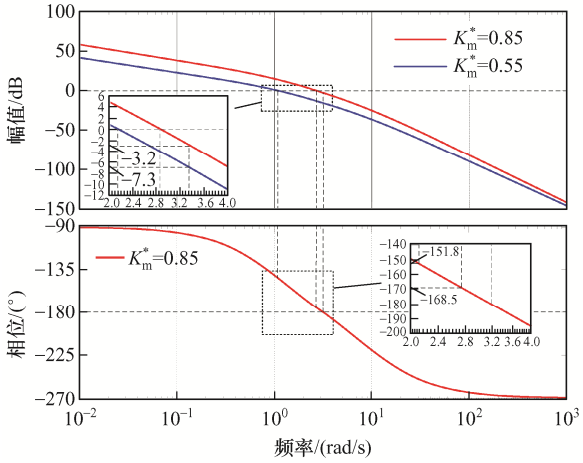


图 7　不同 K_{m}^{*} 取值系统总传递函数伯德图曲线对比

Fig. 7 Comparison of Bode plots curves of total transfer function of systems with different K_{m}^{*} values

4　仿真结果分析

为验证本文所提自适应参数调节与MPC结合的VSG 控制方法的有效性及优越性，基于 MATLAB/Simulink 搭建了如图 1 所示系统的仿真模型，并进行了 VSG 在离网与并网时 2 方面的测试，系统各参数见表 2。

表 2　系统主要仿真参数

Tab. 2 Main simulation parameters of the system

参数	数值
直流侧电压 U_{d} / V	750
参考电压幅值 E_{ref} / V	311
额定角频率 ω_0 / (rad·s^{-1})	100π
频率下垂系数 K_{ω} / (rad·W^{-1})	200
滤波电感 L_{f} / mH	4
滤波电容 C_{f} / μF	10
并网等效电感 L_{g} / mH	5
转动惯量 J / (kg·m^{-2})	0.2
阻尼系数 D / (N·s·m·rad^{-1})	8

4.1　离网时 VSG 频率响应仿真分析

起始状态下系统带额定负载 10 kW，VSG 离网运行，逆变器输出电压约为 220 V，频率稳定在 50 Hz 左右。3.0 s 时向系统投入 5 kW 负载，观察

系统在 3.0 s 内的运行情况，此时 VSG 的有功输出波形如图 8 所示。

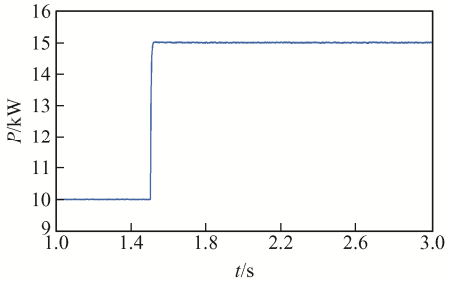


图 8 离网时 VSG 输出有功功率

Fig. 8 VSG output active power when off-grid

图 9 为采用传统 MPC-VSG 与本文所提策略下 MPC 环节的输出有功波形对比，可以看出当系统负载发生变化时，相比于传统 MPC 环节，本文所提策略实时修正了预测方程的系数矩阵，进一步优化了补偿功率 $\Delta \boldsymbol{P}_{\mathrm{m}}^{*}(k)$，使得此方法不仅具备跟随 VSG 控制同步变化的能力，同时还能更新 MPC 控制器的输出补偿功率，在负载突增时相应多输出了 0.8 kW 的有功功率，进一步增强了 VSG 的频率支撑能力。

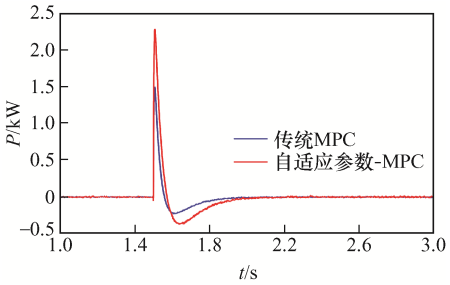
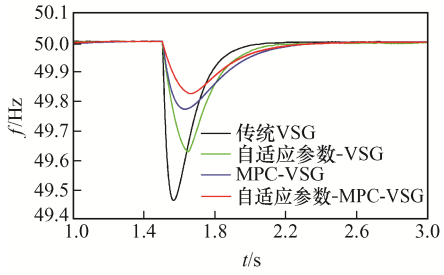


图 9 离网时 MPC 输出有功功率对比

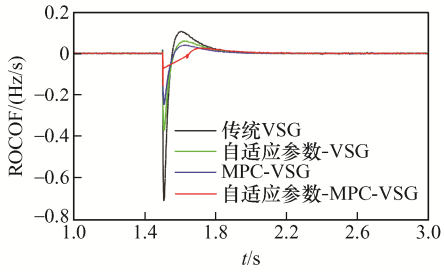
Fig. 9 Comparison of MPC output active power when off-grid

在上述条件下，分别对传统 VSG、自适应参数-VSG、MPC-VSG 及本文所提策略进行了仿真验证，比较了系统的频率响应和频率变化率波形，结果如图 10 所示。图 10(a)显示，负载投入后，传统 VSG 依赖下垂控制进行调频，频率迅速下降 0.55 Hz，且恢复较为缓慢；在自适应参数-VSG 策略下，频率跌落速率有所减缓，最大跌落值为 0.38 Hz；采用 MPC-VSG 策略时，频率跌落较为平缓，最大跌落值为 0.22 Hz；而本文策略下，频率恢复波形平稳，最大频率变化降至 0.18 Hz，相较于传统 VSG 减少约 67%。

图 10(b)显示，采用传统 VSG 策略时，最大频率变化率 ROCOF(rate of change of frequency)为 0.72 Hz/s，自适应参数-VSG 与 MPC 策略分别为 0.38 Hz/s 与 0.26 Hz/s，而本文策略降至 0.16 Hz/s，较传统 VSG 降低约 78%。仿真结果表明，所提策略在离网情况下能有效改善系统的频率偏移和 ROCOF，从而显著提升系统的频率响应性能。



(a) 离网频率响应曲线



(b) 离网ROCOF响应曲线

图 10 离网时频率和 ROCOF 响应对比

Fig. 10 Comparison of frequency and ROCOF responses when off-grid

4.2 并网时 VSG 频率响应仿真分析

4.2.1 负载突变工况仿真分析

初始状态下系统带额定负载 15 kW，VSG 并网运行，电网电压幅值稳定为 380 V，频率稳定在 50 Hz 左右。1.5 s 时向系统投入 5 kW 负载，观察系统在 3.0 s 内的运行情况，此时电网输出有功波形如图 11 所示。可以看出，在遭遇大扰动时，传统 VSG 控制策略下有功输出存在大幅振荡的情况。尽管自适应参数-VSG 和 MPC-VSG 策略在一定程度上抑制了振荡，但其无法有效减少超调量和缩短系统的稳定时间。相较而言，本文所提策略显著减弱了有功功率振荡，超调量减少了 1.82 kW，

稳态时间缩短了 0.14 s，展现了更为优越的动态性能。

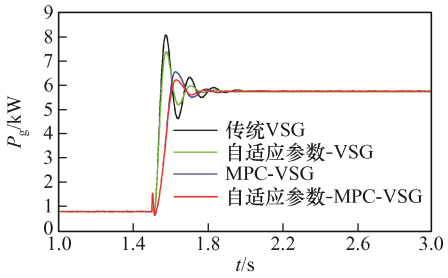


图 11　电网输出有功功率对比

Fig. 11 Comparison of grid output active power

图 12 为并网状态下，传统 MPC-VSG 与本文所提策略在 MPC 环节输出有功功率波形的对比。结果表明，当系统遭遇负载突变扰动时，本文所提策略与离网情形类似，能够提供更强的频率支撑能力。在这一过程中，本文策略相比传统 MPC 多输出了 0.35 kW 的有功功率，且在一定程度上避免了 VSG 并网运行时产生的有功功率振荡问题，输出功率波形更加平稳，有效增强了系统的阻尼特性。

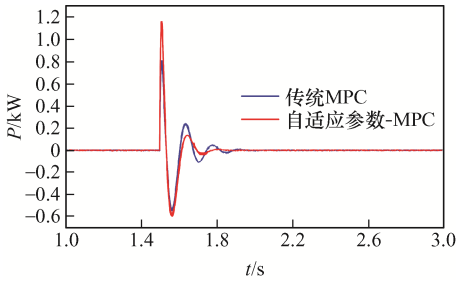
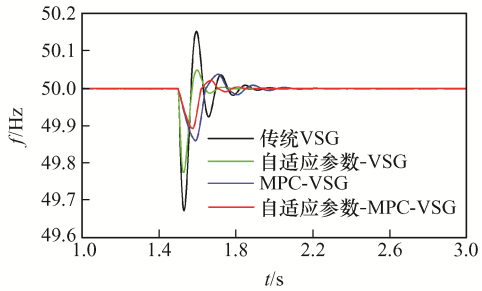


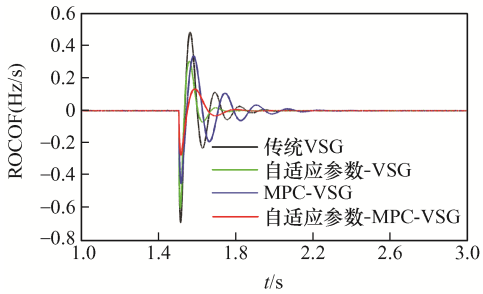
图 12　并网 MPC 输出有功功率对比

Fig. 12 Comparison of MPC output active power during grid-connected operation

图 13 为 4 种控制策略下系统频率响应及 ROCOF 的波形对比。图 13(a)中，传统 VSG 控制下的最大频率变化值为 0.33 Hz，自适应参数-VSG 为 0.22 Hz，MPC-VSG 为 0.16 Hz，而本文所提策略为 0.11 Hz，较传统 VSG 减少约 67%，且频率恢复过程更加平缓，振荡现象显著减弱。图 13(b)则呈现了 4 种策略下的最大 ROCOF，其中，传统 VSG 为 0.69 Hz/s，自适应参数-VSG 为 0.62 Hz/s，MPC-VSG 为 0.46 Hz/s，而本文所提策略为 0.28 Hz/s，相较于传统 VSG 降低了约 59%。上述结果表明，本文所提策略在减小频率振荡幅值方面表现出显著优势，展现了更优异的动态调整能力。



(a) 并网频率响应曲线



(b) 并网ROCOF响应曲线

图 13　并网时频率和 ROCOF 响应对比

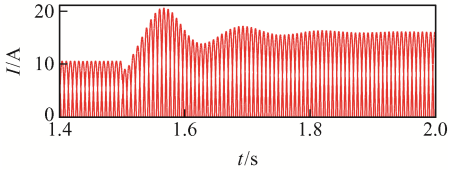
Fig. 13 Comparison of frequency and ROCOF responses during grid connection

图 14 为 4 种控制策略下并网侧输出三相电流正半波波形对比。可以看出，在负载突变情况下，采用传统固定系数控制方案时，电流波形出现较为剧烈的振荡，且振幅较大；单独采用自适应参数控制或 MPC 方法时，振荡现象得到一定程度的抑制，但仍显著存在；而在采用本文所提策略时，电网输出电流波形较为平稳，振幅显著减小，进一步验证了本文所提策略在提升 VSG 并网运行状态下动态性能方面的显著作用。

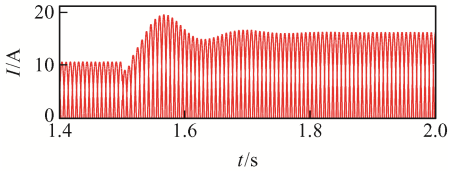
4.2.2　电网相角突变工况仿真分析

初始状态下系统带额定负载 15 kW，VSG 并网运行，电网电压幅值稳定为 380 V，频率稳定在 50 Hz 左右。1.5 s 时电网相位突降 10°，观察系统在 3.0 s 内的运行情况，此时 VSG 输出有功波形对比如图 15 所示。可以看出，在电网相位突降时，VSG 能够迅速反应并增发功率以维持频率的稳定。与传统 VSG 控制策略相比，后者的输出功率存在较大振

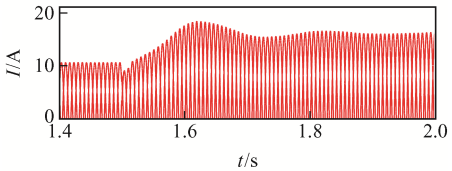
荡现象，而在本文所提策略下，VSG 不仅能够保持输出功率稳定不变，还显著抑制了功率波动，使得有功输出曲线更加平滑。通过这种优化，VSG 能够更平稳地过渡电网相位突变的暂态过程，提升系统在动态变化中的稳定性和响应能力。



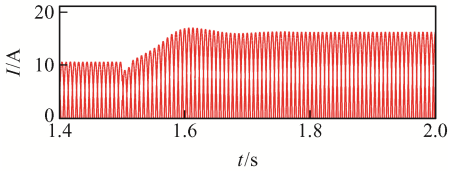
(a) 传统VSG并网侧电流



(b) 自适应参数-VSG并网侧电流



(c) MPC-VSG并网侧电流



(d) 自适应参数-MPC-VSG并网侧电流

图 14 并网侧电流波形对比

Fig. 14 Comparison of current waveforms on the grid side

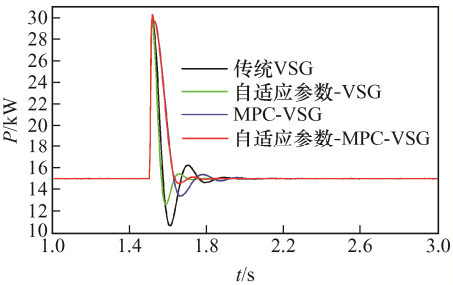


图 15 电网相位突变 VSG 输出有功功率对比

Fig. 15 Comparison of VSG output active power with sudden phase change in power grid

图 16 为 4 种控制策略下的系统频率响应对比曲线。可以看出，当电网相位发生突降时，传统 VSG 控制最大频率变化值为 0.47 Hz，自适应参数-VSG 为 0.31 Hz，MPC-VSG 为 0.22 Hz，本文所提策略为 0.17 Hz，较传统 VSG 减小约 64%。此外，本文所提策略在频率恢复至额定值的过程中表现出较快的恢复速度，同时上升过程更加平缓，有效提升了系统的动态响应性能。

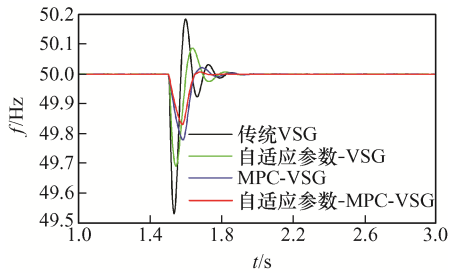
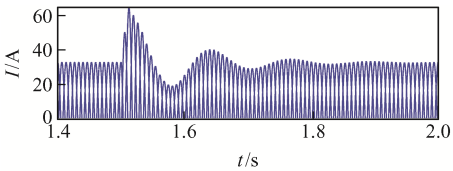


图 16 电网相角突变频率响应曲线对比

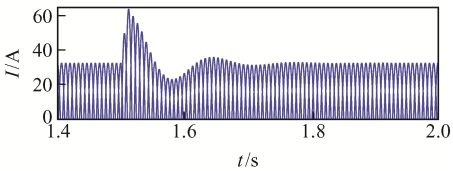
Fig. 16 Comparison of frequency response curves of phase angle change in power grid

图 17 为在电网相位突降情况下，4 种控制策略控制下并网侧三相电流正半波波形对比。可以看出，尽管单独使用自适应参数或 MPC 策略在应对电网相位突降时都能保持一定的电流输出，但在本文所提策略下，并网侧输出电流波形明显更为平缓。这意味着所提策略能更有效地减少电流波动，避免大幅波动对系统的影响，提高了电网稳定性。

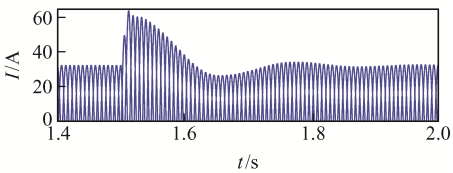
综上所述，本文所提策略在 VSG 并离网条件下均能有效抑制负载突变或电网相位突变引起的



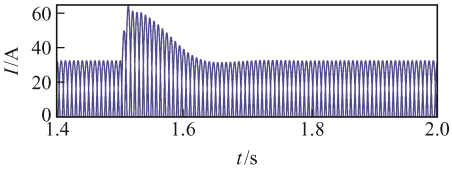
(a) 传统VSG并网侧电流



(b) 自适应参数-VSG并网侧电流



(c) MPC-VSG并网测电流



(d) 自适应参数-MPC-VSG并网侧电流

图 17　电网相角突变并网侧电流波形对比

Fig. 17 Comparison of current waveforms of grid-side with sudden phase angle change in power grid

频率波动，等效提升了系统的阻尼特性。与单独采用自适应参数或 MPC 方法相比，本文所提策略在 VSG 离网运行时显著降低了系统频率变化幅值和 ROCOF，展现了更优秀的暂态响应性能。在 VSG 并网条件下，面对负载突变时，本文所提策略不仅有效减小了频率变化幅值和 ROCOF，还在一定程度上抑制了并网过程中的有功功率振荡问题；而在电网相位突变情况下，所提方法同样能够显著降低频率变化幅值，并有效平滑 VSG 的有功输出，进一步提升了系统的动态响应能力。

5　结论

本文提出了一种自适应参数与 MPC 结合的 VSG 调频控制策略，通过自适应参数调节更新得到 VSG 转动惯量与阻尼系数并输入到转子机械方程中，MPC 控制器在线更新预测方程并对 VSG 额定输入功率进行修正，改善了系统的暂态响应特性。仿真结果表明，本文所提策略在并离网条件下均能降低系统的频率偏移与频率变化率，并使电网有功输出更加平缓，进一步提升了系统稳定性。

本文主要研究所提策略对单机 VSG 系统暂态频率稳定性的提升效果，下一步将重点探究面对 VSG 多机并联情况下，所提策略的适应性及鲁棒性，以进一步提升新能源大量占比下电网的稳定性。

参考文献：

[1] 王宇飞, 吕晓宁, 时海, 等. 基于 EGAT 的高比例分布式光伏配电网的脆弱性辨识[J]. 电源学报, 2026, 24 (5): 219-228.
Wang Yufei, LÜ Xiaoning, Shi Hai, et al. Vulnerability identification of high proportion distributed photovoltaic power distribution network based on EGAT [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24 (5): 219-228. (in Chinese)

[2] 孟建辉, 赵彭辉, 王毅, 等. 基于虚拟惯性控制的多光储单元协同运行研究[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1921-1931.
Meng Jianhui, Zhao Penghui, Wang Yi, et al. Cooperative operation of optical storage system based on virtual inertial control [J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1921-1931. (in Chinese)

[3] Li Yong, He Li, Liu Fang, et al. Flexible voltage control strategy considering distributed energy storages for DC distribution network [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 163-172.

[4] 刘宝谨, 李春晨, 林佳鹏, 等. 下垂控制逆变器的序阻抗建模分析及验证[J]. 电源学报, 2025, 23(4): 151-162.
Liu Baojin, Li Chunchen, Lin Jiapeng, et al. Sequential impedance modeling and verification for droop-controlled inverters [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(4): 151-162. (in Chinese)

[5] Lou Guannan, Gu Wei, Lu Xiaonan, et al. Distributed secondary voltage control in islanded microgrids with consideration of communication network and time delays [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(5): 3702-3715.

[6] 陈雪梅, 陆超, 韩英铎. 电力系统频率问题浅析与频率特性研究综述[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 1-9.
Chen Xuemei, Lu Chao, Han Yingduo. Review of power system frequency problems and frequency dynamic characteristics [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2020, 39(1): 1-9. (in Chinese)

[7] 赵晋泉, 汤建军, 吴迪, 等. 直流馈入受端电网暂态电压与频率稳定紧急协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(22): 45-53.
Zhao Jinquan, Tang Jianjun, Wu Di, et al. Emergency coordination control strategy for transient voltage and transient frequency stability in HVDC infeed receiving-end power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22): 45-53. (in Chinese)

[8] 张健, 李天慧, 马刚, 等. 基于智能负载的光伏并网电压和频率稳定方法研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(10): 52-57.
Zhang Jian, Li Tianhui, Ma Gang, et al. Voltage and

frequency stabilization method for grid-connected photovoltaic system based on smart load [J]. Smart Power, 2020, 48(10): 52-57. (in Chinese)

[9] 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. (in Chinese)

[10] 王振浩, 张越, 成龙, 等. 多参数协同自适应的改进虚拟同步控制策略[J]. 电网技术, 2023, 47(6): 2403-2413.
Wang Zhenhao, Zhang Yue, Cheng Long, et al. Improved virtual synchronization control strategy with multi-parameter adaptive collaboration [J]. Power System Technology, 2023, 47(6): 2403-2413. (in Chinese)

[11] 杨效, 曾成碧, 苗虹, 等. 优化虚拟同步发电机惯量和阻尼的自适应控制策略[J]. 太阳能学报, 2023, 44(11): 495-504.
Yang Xiao, Zeng Chengbi, Miao Hong, et al. Optimizing adaptive inertia and damping control strategy of virtual synchronous generator [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(11): 495-504. (in Chinese)

[12] 张子星, 赵晋斌, 曾志伟, 等. 基于 RBF 的 VSG 虚拟惯量和动态阻尼补偿自适应控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 155-164.
Zhang Zixing, Zhao Jinbin, Zeng Zhiwei, et al. VSG virtual inertia and dynamic damping compensation adaptive control based on RBF [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 155-164. (in Chinese)

[13] Long Bo, Liao Yong, Chong K T, et al. MPC-controlled virtual synchronous generator to enhance frequency and voltage dynamic performance in islanded microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 953-964.

[14] 孙玉树, 张国伟, 唐西胜, 等. 风电功率波动平抑下的 MPC 双储能控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(3): 571-578.
Sun Yushu, Zhang Guowei, Tang Xisheng, et al. Research on MPC and daul energy storage control strategies with wind power fluctuation mitigation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(3): 571-578. (in Chinese)

[15] 海涛, 刘昱麟, 王钧, 等. 基于模型预测控制的光伏混合储能系统控制策略[J]. 电源学报, 2026, 24 (3): 111-118.
Hai Tao, Liu Yulin, Wang Jun, et al. Control strategy for photovoltaic hybrid energy storage system based on model predictive control [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24 (3): 111-118. (in Chinese)

[16] 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)

[17] 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 Kairang, Zhao Yiming, Meng Jianhui, et al. Smooth grid-connected strategy for photovoltaic-storage virtual synchronous generator based on adaptive model predictive control [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 831-839. (in Chinese)

[18] 李帅虎, 向丽珍, 向振宇, 等. 用于改善VSG频率响应的模型预测控制方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2856-2864.
Li Shuaihu, Xiang Lizhen, Xiang Zhenyu, et al. MPC control method for improving VSG frequency response [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2856-2864. (in Chinese)

[19] Long Bo, Liao Yong, Chong K T, 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.

[20] 陈虹. 模型预测控制[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
Chen Hong. Model Predictive Control [M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)



张世栋

作者简介：

张世栋(1998—)，男，中国电源学会学生会员，通信作者，硕士。研究方向：新能源并网发电控制。E-mail：1422329490@qq.com。

李培强(1975—)，男，博士，教授。研究方向：电力系统运行分析与控制，智能电网与分布式发电，负荷建模。E-mail：lpqcs@hnu.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)