

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231615

基于频率超前校正的 VSG 并联系统有功振荡抑制策略

苗长新, 赵文鹏, 刘家明, 祝宇航, 牛作虎, 李彪

(中国矿业大学电气工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 针对虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)在外界扰动时存在的有功暂态振荡问题, 提出一种基于频率超前校正的 VSG 并联系统有功振荡抑制策略。首先, 建立 VSG 并联系统有功环小信号模型, 分析负载功率突变时的 VSG 有功振荡机理。然后, 基于微分超前校正思想并结合 VSG 有功环控制结构, 将有功功率反馈至频率偏差之上, 从而增大系统阻尼程度并抑制 VSG 并联系统有功暂态振荡。接下来, 建立改进型 VSG 并联系统状态空间模型, 通过根轨迹分析系统动态响应性能。最后, 通过 Matlab/Simulink 仿真和实验验证了该方案能够有效抑制 VSG 并联系统有功暂态振荡, 并且不影响其稳态有功特性。

关键词: 虚拟同步发电机; 有功振荡; 超前校正; 状态空间模型; 根轨迹分析

Active power oscillation suppression strategy for VSG parallel systems based on frequency leading correction

MIAO Changxin, ZHAO Wenpeng, LIU Jiaming, ZHU Yuhang, NIU Zuohu, LI Biao

(School of Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: There is an active power transient oscillation problem in a virtual synchronous generator (VSG) when there are external disturbances. This paper proposes an active power oscillation suppression strategy for a VSG parallel system based on frequency lead correction. First, a small signal model is established for the active power loop of the VSG parallel system and the VSG active power oscillation mechanism is analyzed when the load power suddenly changes. Then, based on the differential advance correction idea and combined with the VSG active power loop control structure, the active power is fed back to the frequency deviation, thereby increasing the system damping degree and suppressing the transient oscillation of the VSG parallel system active power. Next, an improved VSG parallel system state space model is established and the dynamic response performance of the system through root locus analysis is analyzed. Finally, Matlab/Simulink simulation and experimental verification show that the proposed scheme can effectively suppress transient active power oscillation in a VSG parallel system without affecting their steady-state active power characteristics.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62076243).

Key words: virtual synchronous generator; active power oscillation; forward correction; state space model; root locus analysis

0 引言

随着化石能源的逐渐枯竭以及环境保护的日益加强, 世界各国都在积极推动风电、太阳能等新能源发电技术的应用^[1-3]。为了实现我国提出的“碳达峰、碳中和”战略目标, 大力开发新能源电力, 促进高比例可再生能源并网消纳, 是构建新型电力系统的必由之路^[4-6]。

随着新能源渗透率的提高, 微电网惯量缺失问题日益突出^[7]。为了提高微电网频率稳定性, 研究人员提出了虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制方案。VSG 通过模拟同步发电机的转子惯量和阻尼特性, 有效提高了微电网抵抗外界干扰的能力^[8]。然而, VSG 有功环为二阶系统, 在外界干扰下存在有功超调和振荡问题^[9]。当孤岛微电网的负载功率突变时, VSG 并联系统存在严重的有功振荡问题, 难以确保微电网稳定运行。

目前, 针对 VSG 并联系统有功振荡问题, 已有

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(62076243)

大量研究成果。文献[10]提出一种二阶虚拟惯性优化策略, 在确保 VSG 有功稳态控制精度的同时, 实现有功暂态振荡抑制。文献[11]建立 VSG 并联系统有功环小信号模型, 定量分析惯量和阻尼系数对并联系统性能的影响。文献[12]建立 VSG 并联系统的全阶小信号模型, 全面分析不同参数对系统稳定性的影响。文献[13]基于通信线路来实现相邻 VSG 之间的阻尼调节, 从而使负荷突变下的各单机 VSG 输出频率趋于一致, 从而抑制有功暂态振荡。文献[14]采用一致性算法协调各 VSG 输出有功值, 进而实现并联系统的二次调频, 有效抑制并联系统功率振荡。文献[15]提出一种改进型参数自适应方案, 有效提高了 VSG 并联系统动态性能和频率稳定性。文献[16]基于惯量自适应来实现 VSG 并联系统有功振荡抑制, 但是没有发挥阻尼系数也可自适应的潜力。文献[17]基于 VSG 暂态过程分析, 提出一种惯量、阻尼以及有功下垂系数协同自适应策略。文献[18]构造有功暂态阻尼和虚拟负电感来增强系统阻尼, 从而抑制 VSG 并联系统有功振荡。文献[19]将频率偏差经过微分等效环节叠加在有功偏差之上, 从而抑制并联系统有功振荡。文献[20]提出一种相位前馈阻尼方案, 快速抑制 VSG 并联系统有功振荡的同时, 具有良好的频率特性。文献[21]提出一种基于带通阻尼功率的 VSG 有功振荡抑制策略, 但是该方案使得 VSG 有功环变为 4 阶系统, 滤波器参数设计比较困难。文献[22]将 VSG 有功偏差经过一阶低通滤波器前馈至相位之上, 通过调节前馈系数即可增大系统阻尼比, 从而抑制有功振荡。文献[23]基于现代控制理论来设计状态反馈变量, 从而增大系统阻尼程度并改善有功动态性能。文献[24]将 VSG 输出有功经过一阶环节作差构造暂态电磁功率, 实现 VSG 并联系统有功振荡抑制。文献[25]将虚拟阻抗、功率微分以及参数自适应结合起来, 实现 VSG 并联系统有功振荡抑制。综上所述, VSG 并联系统有功振荡抑制方案存在系统阶次较高以及工程实现困难的问题。

针对上述问题, 本文提出一种基于频率超前校正的 VSG 并联系统有功振荡抑制策略。首先, 建立 VSG 并联系统有功小信号模型, 分析 VSG 有功振荡机理。其次, 基于微分超前校正思想, 将 VSG 输出有功反馈至频率偏差上, 等效实现输出有功的比例微分(proportional differential, PD)控制, 从而增大系统阻尼, 抑制有功振荡。接下来, 建立改进 VSG 并联系统状态空间模型, 通过根轨迹分析系统稳定性和动态响应性能。最后, 通过 Matlab/Simulink 仿真和实验验证了本文所提方案的正确性和有效性。

1 VSG 并联系统有功特性分析

1.1 VSG 控制原理

基于 VSG 的分布式电源控制框图如图 1 所示。其中, 直流侧的分布式能源等效为理想直流电压源。 U_{dc} 为直流侧电源; L_f 和 C_f 分别为滤波电感和滤波电容; u_{abc} 和 i_{abc} 分别为 VSG 输出电压和输出电流; Z_{line} 为线路传输阻抗。

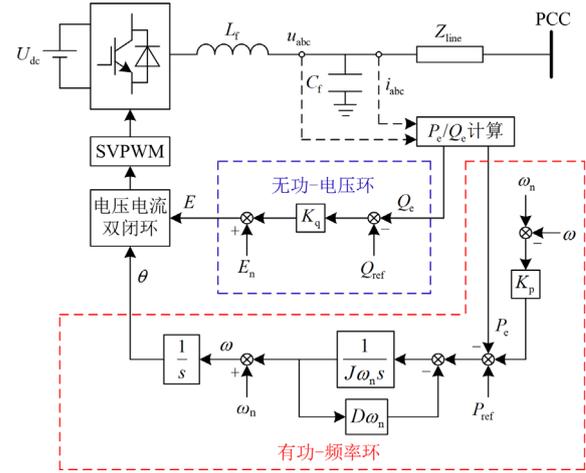


图 1 VSG 拓扑结构及控制框图

Fig. 1 Topology and control block diagram of VSG

VSG 控制结构包括功率环和电压电流双闭环, 其中有功-频率环和无功-电压环根据 VSG 输出功率来调节输出电压的相位 θ 和幅值 E 。电压电流双闭环主要实现逆变器输出电压的稳定控制。

VSG 具备同步发电机的稳态下垂特性, 其中有功-频率和无功-电压环节的下垂控制表达式分别如式(1)和式(2)所示。

$$P_m = P_{ref} + K_p(\omega_n - \omega) \quad (1)$$

$$E = E_n + K_q(Q_{ref} - Q_c) \quad (2)$$

式中: P_m 和 P_{ref} 分别为 VSG 虚拟机械功率和有功参考值; K_p 为有功下垂系数; ω_n 和 ω 分别为 VSG 频率参考值和实际值; E 和 E_n 分别为 VSG 电压幅值的实际值和参考值; K_q 为无功下垂系数; Q_{ref} 和 Q_c 分别为 VSG 无功参考值和实际值。

VSG 通过模拟同步发电机的转子惯量和阻尼特性, 实现对微电网频率的有效支撑, 其中有功环包含的转子运动方程为

$$J\omega_n \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_c - D\omega_n(\omega - \omega_n) \quad (3)$$

式中: J 为 VSG 虚拟惯量; P_c 为 VSG 输出有功实际值; D 为 VSG 阻尼系数。

根据 VSG 有功环输出相位 θ 以及无功环输出幅值 E , 计算其输出电压参考值 e_{abc} 。将 e_{abc} 送入电压电流双闭环, 通过 SVPWM 环节获得逆变器开关信号, 从而实现 VSG 输出电压的准确跟踪。

根据式(1)和式(3), 整理可得

$$J\omega_n \frac{d\omega}{dt} = P_{ref} - P_c - (D\omega_n + K_p)(\omega - \omega_n) \quad (4)$$

由式(4)可以看出, VSG 有功下垂系数 K_p 与阻尼系数 D 所处位置相同, 二者相互耦合。因此, 阻尼 D 的数值将影响 VSG 有功-频率下垂特性。当 VSG 输出频率偏离额定值 ω_n 时, 阻尼系数 D 会引起额外的稳态有功偏差 P_d , $P_d = D\omega_n(\omega - \omega_n)$ 。

1.2 VSG 并联系统有功振荡机理

在新能源分布式发电系统中, 常采用逆变器并联方式为负载供电, VSG 并联带负载运行的等效电路如图 2 所示。其中, VSG1 和 VSG2 等效为 2 个理想电压源 $E_1 \angle \delta_1$ 和 $E_2 \angle \delta_2$, Z_{line1} 和 Z_{line2} 为线路传输阻抗, Z_{load} 为负载阻抗, $U_{bus} \angle 0^\circ$ 为公共连接点电压, I_1 和 I_2 分别为 VSG1 和 VSG2 的输出电流。

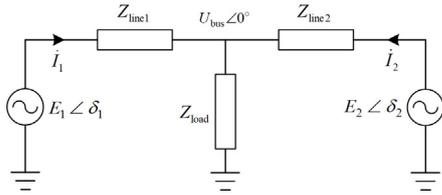


图 2 VSG 并联系统等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of VSG parallel system

本文首先建立单机 VSG 有功小信号模型, 进一步得到 VSG 并联系统有功小信号模型, 从而分析 VSG 并联系统有功动态性能。

当单机 VSG 离网运行时, 根据功率传输原理可知, 当线路阻抗 Z_{line} 呈感性时, 系统有功和无功实现解耦, 可以得到 VSG 输出有功 P_c 的表达式如式(5)所示。

$$P_c = \frac{3EU_{bus}}{X} \sin \delta \approx \frac{3EU_{bus}}{X} \delta = K\delta \quad (5)$$

式中: E 为 VSG 输出电压幅值; U_{bus} 为 PCC 电压幅值; X 为传输阻抗值; δ 为 VSG 输出功角, 一般很小, 满足 $\sin \delta \approx \delta$; K 为 VSG 有功增益系数, $K = \frac{3EU_{bus}}{X}$ 。

根据 VSG 控制框图以及表达式(5), 得到单机 VSG 带负载时的有功环小信号框图, 如图 3 所示。

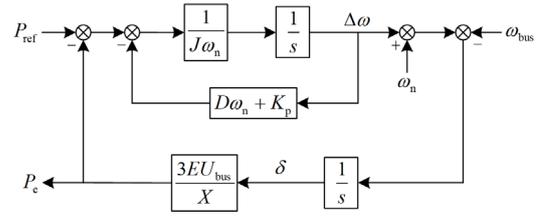


图 3 VSG 有功环控制框图

Fig. 3 Active power loop control block diagram of VSG

根据图 3 可知, VSG 有功环扰动主要来自 P_{ref} 和 ω_{bus} 。通常, VSG 有功参考值 P_{ref} 保持不变, 而负载功率突变将会引起母线角频率 ω_{bus} 波动, 使得 VSG 调整输出功角 δ , 其输出有功也将存在暂态过程, 直至系统稳态时, VSG 输出功率 P_c 等于负载功率 P_{load} , 即 $P_c = P_{load}$ 。

根据功率守恒定律可知, 当负载功率突变时, 等效于 VSG 输出有功突变 ΔP_c 。由图 3 可以得到, 负载功率变化量 ΔP_{load} 引起的频率波动 $\Delta \omega$ 表达式为

$$\frac{\Delta \omega}{\Delta P_{load}} = -\frac{1}{J\omega_n s + D\omega_n + K_p} \quad (6)$$

可以看出, 该传递函数为一阶惯性环节。因此, 单机 VSG 所带负载功率突变时, 其输出频率不会出现超调和振荡。相较于下垂控制, VSG 输出频率缓慢变化, 能够为系统提供惯性。

根据单机 VSG 有功环小信号模型以及并联系统结构, 可以得到 VSG 并联系统有功环传递函数框图, 如图 4 所示。其中, P_{out} 为 VSG 并联系统总的输出有功值。

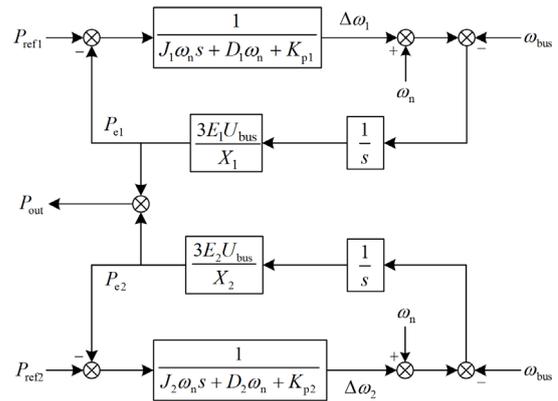


图 4 VSG 并联系统有功环控制结构图

Fig. 4 Active power loop control structure diagram of VSG parallel system

根据图 4 可得, 当 VSG 并联系统所带负载功率 P_{load} 突变引起母线角频率 ω_{bus} 变化时, 各单机 VSG 输出有功变化量 ΔP_{ci} 的表达式为

$$\begin{cases} \frac{\Delta P_{e1}}{\Delta \omega_{bus}} = -\frac{K_1(J_1\omega_n s + D_1\omega_n + K_{p1})}{J_1\omega_n s^2 + (D_1\omega_n + K_{p1})s + K_1} \\ \frac{\Delta P_{e2}}{\Delta \omega_{bus}} = -\frac{K_2(J_2\omega_n s + D_2\omega_n + K_{p2})}{J_2\omega_n s^2 + (D_2\omega_n + K_{p2})s + K_2} \end{cases} \quad (7)$$

式中: K_1 、 K_2 分别为 VSG1 和 VSG2 的有功增益系数, $K_1 = \frac{3E_1 U_{bus}}{X_1}$ 、 $K_2 = \frac{3E_2 U_{bus}}{X_2}$; J_1 和 J_2 、 D_1 和 D_2 以及 K_{p1} 和 K_{p2} 分别为 VSG1 和 VSG2 的虚拟惯量、阻尼系数以及有功频率下垂系数。

在 VSG 并联系统中, VSG1 和 VSG2 共同承担负载功率, 可以得到

$$\Delta P_{load} = \Delta P_{e1} + \Delta P_{e2} \quad (8)$$

将式(4)进行拉普拉斯变换, 可以得到 VSG 有功变化 ΔP_{ei} 引起角频率变化量 $\Delta \omega_i$ 的传递函数为

$$G_i(s) = \frac{\Delta \omega_i}{\Delta P_{ei}} = -\frac{1}{J_i\omega_n s + D_i\omega_n + K_{pi}} \quad (9)$$

联立上述 3 个表达式, 得到负载功率突变时, VSG1 和 VSG2 角频率变化量 $\Delta \omega_i$ 的表达式为

$$\begin{cases} \frac{\Delta \omega_1}{\Delta P_{load}} = \frac{AG_1(s)}{A+B} \\ \frac{\Delta \omega_2}{\Delta P_{load}} = \frac{BG_2(s)}{A+B} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $A = \frac{\Delta P_{e1}}{\Delta \omega_{bus}}$; $B = \frac{\Delta P_{e2}}{\Delta \omega_{bus}}$ 。

为了直观展示 VSG 并联系统动态响应过程, 根据式(10), 画出负载功率阶跃变化时的各单机 VSG 频率变化量曲线如图 5 所示。其中, VSG 并联系统参数如表 1 所示, 负载功率变化量 ΔP_{load} 为 5 kW。

由图 5 可知, 当 VSG 并联系统负载功率突变时, 由于 VSG 参数 J 、 D 、 K_p 以及线路阻抗 X 的差异, 造成各 VSG 动态响应速度不同, 频率变化快

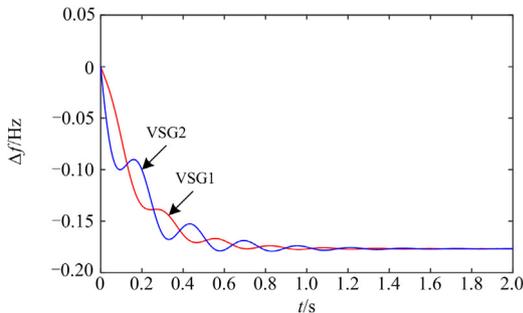


图 5 负载功率突变下的 VSG 输出频率变化量曲线
Fig. 5 Output frequency variation curve of each VSG when sudden load power changes

表 1 VSG 并联系统主要参数

Table 1 Main parameters of VSG parallel system					
参数	VSG1	VSG2	参数	VSG1	VSG2
E_n/V	310	310	$J/(kg/m^2)$	1.6	0.8
$\omega_n/(rad/s)$	314	314	$D/(N \cdot m \cdot s/rad)$	0	0
$K_p/(W \cdot s/rad)$	3000	1500	L_{line}/mH	3	1.5

慢也不一致。根据 VSG 有功环控制框图可知, 有功偏差 ΔP_{ei} 与频率变化量 $\Delta \omega_i$ 成惯性关系, 因此各单机 VSG 输出有功将会出现暂态振荡问题。

1.3 VSG 并联系统稳定性分析

根据现代控制理论, 建立 VSG 并联系统状态空间模型, 采用根轨迹分析系统稳定性及动态性能。

首先, 对于 VSG 并联系统, 需要观测其输出频率和有功功率, 因此将状态空间模型的输出变量设置为 $\mathbf{y} = [\Delta \omega_1 \quad \Delta \omega_2 \quad \Delta P_{e1} \quad \Delta P_{e2}]^T$, 其中 $\Delta \omega_1$ 和 $\Delta \omega_2$ 分别为 VSG1 和 VSG2 角频率偏差值变化量, ΔP_{e1} 和 ΔP_{e2} 分别为 VSG1 和 VSG2 输出有功变化量。

然后, 根据实际情况, 将 VSG 并联系统输入变量 \mathbf{u} , 设置 $\mathbf{u} = [\Delta P_{ref1} \quad \Delta P_{ref2} \quad \Delta P_{load}]^T$, 其中 ΔP_{ref1} 和 ΔP_{ref2} 分别为 VSG1 和 VSG2 有功参考值变化量, ΔP_{load} 为负载功率变化量。

根据现代控制理论可知, 在系统状态空间模型表达式中, 需要求出状态变量 \mathbf{x} 的导数, 因此状态变量要根据方程推导来确定。

VSG 转子运动方程的小信号表达式为

$$J_i\omega_n \frac{d\Delta \omega_i}{dt} = \Delta P_{refi} - \Delta P_{ei} - (D_i\omega_n + K_{pi})\Delta \omega_i \quad (11)$$

进一步, 可以得到

$$\Delta \dot{\omega}_i = -\frac{D_i\omega_n + K_{pi}}{J_i\omega_n} \Delta \omega_i + \frac{\Delta P_{refi}}{J_i\omega_n} - \frac{\Delta P_{ei}}{J_i\omega_n} \quad (12)$$

根据式(12)可知, $\Delta \omega_i$ 的导数可以用 $\Delta \omega_i$ 、 ΔP_{refi} 以及 ΔP_{ei} 表示。因此, $\Delta \omega_i$ 可以选为状态变量。然而, ΔP_{ei} 的导数难以直接求解, 其不能作为状态变量, 需要对其进行等效转换。

将 ΔP_{ei} 进行等效变换, 可以得到

$$\begin{cases} \Delta P_{e1} = K_1(\Delta \delta_1 - \frac{\Delta P_{load}}{K_1 + K_2}) + \frac{K_1}{K_1 + K_2} \Delta P_{load} \\ \Delta P_{e2} = -K_2(\Delta \delta_1 - \frac{\Delta P_{load}}{K_1 + K_2}) + \frac{K_2}{K_1 + K_2} \Delta P_{load} \end{cases} \quad (13)$$

式中, $\Delta \delta_1$ 为 VSG1 的功角变化量。

式(13)中, 令 $\Delta P_{\delta} = (\Delta \delta_1 - \frac{\Delta P_{load}}{K_1 + K_2})$ 。由于 ΔP_{load} 属于系统输入变量, 如果 ΔP_{δ} 也被选为系统状态变

量,此时 ΔP_{ei} 可以用系统状态变量和输入变量表示。根据式(12)可知,此时可以用系统输入变量 ΔP_{load} 和 ΔP_{refi} 、状态变量 $\Delta \omega_i$ 和 ΔP_{δ} 来表示 $\Delta \omega_i$ 的导数。因此,需要求出 ΔP_{δ} 的导数表达式,从而验证其作为系统状态变量的可行性。

由VSG有功环结构和功率传输定理,得到

$$\begin{cases} \Delta P_{ei} = \frac{3E_i U_{bus}}{X_i} \Delta \delta_i \\ \Delta \delta = \int (\Delta \omega_i - \Delta \omega_{bus}) dt \end{cases} \quad (14)$$

式中, E_i 和 X_i 分别为VSG1和VSG2输出电压幅值以及传输阻抗值, $i=1,2$ 。

进一步,可以得到

$$\Delta \omega_i = \Delta \omega_{bus} + \frac{1}{K_i} \frac{d\Delta P_{ei}}{dt} \quad (15)$$

联立式(8),可以得到

$$\Delta \omega_{bus} = -\frac{\Delta \dot{P}_{load}}{K_1 + K_2} + \frac{K_1}{K_1 + K_2} \Delta \omega_1 + \frac{K_2}{K_1 + K_2} \Delta \omega_2 \quad (16)$$

进一步,得到 ΔP_{δ} 的导数表达式为

$$\Delta \dot{P}_{\delta} = \frac{K_2}{K_1 + K_2} (\Delta \omega_1 - \Delta \omega_2) \quad (17)$$

根据式(17)可知, $\Delta \dot{P}_{\delta}$ 可以用状态变量 $\Delta \omega_1$ 和 $\Delta \omega_2$ 来表示。因此,该变量应选为VSG并联系统状态变量。

综上所述,可以得到VSG并联系统状态空间模型如式(18)所示。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{A}_1 \mathbf{x}_1 + \mathbf{B}_1 \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{y}_1 = \mathbf{C}_1 \mathbf{x}_1 + \mathbf{D}_1 \mathbf{u}_1 \end{cases} \quad (18)$$

式中,状态变量 \mathbf{x}_1 、输入变量 \mathbf{u}_1 以及输出变量 \mathbf{y}_1 的表达式分别为

$$\mathbf{x}_1 = \left[\Delta \omega_1 \quad \Delta \omega_2 \quad \Delta \delta_1 - \frac{\Delta P_{load}}{K_1 + K_2} \right]^T \quad (19)$$

$$\mathbf{u}_1 = [\Delta P_{ref1} \quad \Delta P_{ref2} \quad \Delta P_{load}]^T \quad (20)$$

$$\mathbf{y}_1 = [\Delta \omega_1 \quad \Delta \omega_2 \quad \Delta P_{e1} \quad \Delta P_{e2}]^T \quad (21)$$

系统状态矩阵 \mathbf{A}_1 、控制矩阵 \mathbf{B}_1 、输出矩阵 \mathbf{C}_1 和直接传递矩阵 \mathbf{D}_1 的表达式分别为

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} -\frac{K_{p1} + D_1 \omega_n}{J_1 \omega_n} & 0 & -\frac{K_1}{J_1 \omega_n} \\ 0 & -\frac{K_{p2} + D_2 \omega_n}{J_2 \omega_n} & \frac{K_1}{J_2 \omega_n} \\ \frac{K_2}{K_1 + K_2} & -\frac{K_2}{K_1 + K_2} & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_1 \omega_n} & 0 & -\frac{K_1}{J_1 \omega_n (K_1 + K_2)} \\ 0 & \frac{1}{J_2 \omega_n} & -\frac{K_2}{J_2 \omega_n (K_1 + K_2)} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & K_1 \\ 0 & 0 & -K_1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\mathbf{D}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_1}{K_1 + K_2} \\ 0 & 0 & \frac{K_2}{K_1 + K_2} \end{bmatrix} \quad (25)$$

可以求出,VSG并联系统状态空间模型的传递函数表达式 $\mathbf{G}(s)$ 为

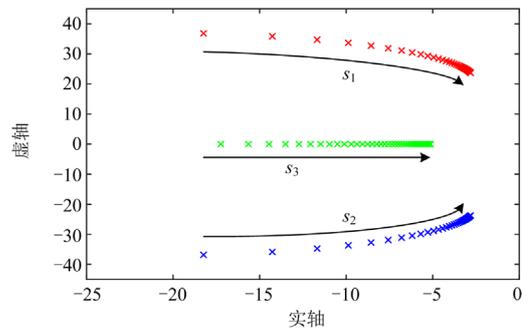
$$\mathbf{G}(s) = \mathbf{C}_1 (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_1)^{-1} \mathbf{B}_1 + \mathbf{D}_1 \quad (26)$$

式中, \mathbf{I} 为单位矩阵。

根据现代控制理论可知,系统状态矩阵 \mathbf{A}_1 的特征值即为传递函数 $\mathbf{G}(s)$ 的极点。结合表1参数,画出惯量 J_1 以及阻尼系数 D 变化时的系统根轨迹如图6所示。其中,VSG1的惯量 J_1 由0.1增大到2,VSG1阻尼系数 D_1 与VSG2的阻尼系数 D_2 保持相等,其数值由0逐渐增大到60。

由图6(a)可知,随着VSG1惯量 J_1 逐渐增大,系统主导极点 s_1 和 s_2 逐渐靠近虚轴,使得系统阻尼比和自然振荡角频率逐渐减小,VSG并联系统输出有功的超调和振荡程度逐渐增大,不利于系统稳定。由图6(b)可知,随着各单机VSG阻尼系数 D_1 和 D_2 逐渐增大,极点 s_3 逐渐远离虚轴,极点 s_1 和 s_2 逐渐远离虚轴并靠近实轴。VSG并联系统阻尼比逐渐增大,有功振荡将得到一定程度的抑制。

根据上述分析,减小单机VSG惯量 J 或增大阻



(a) VSG1惯量 J_1 增大

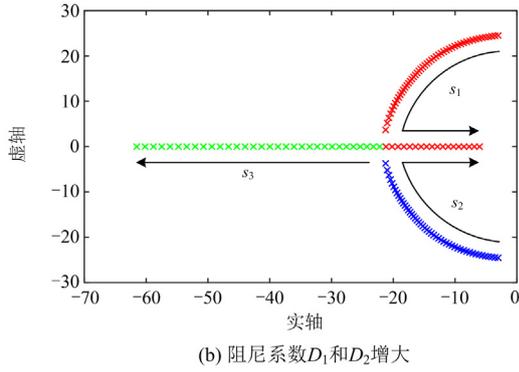


图 6 VSG 并联系统有功小信号模型的根轨迹
Fig. 6 Root locus of active small signal model for VSG parallel system

尼系数 D , 均能够一定程度地抑制有功暂态振荡。但是, 减小惯量 J 不利于频率支撑, 削弱系统惯性水平。而 VSG 阻尼系数 D 与下垂系数 K_p 耦合, 增大阻尼系数 D 将改变 VSG 有功下垂特性, 不利于并联系统功率分配。由此可知, 通过调节系统固定参数, 难以兼顾 VSG 并联系统的暂态和稳态性能。

2 VSG 并联系统有功振荡抑制策略

针对 VSG 并联系统阻尼程度较弱, 负载功率变化时存在有功振荡的问题, 本文基于微分超前校正原理, 提出一种基于频率超前校正的 VSG 并联系统功率振荡抑制策略。

2.1 微分超前校正理论

根据自动控制理论^[26], 微分环节能够反映输入信号的变化趋势, 产生有效的早期修正信号, 从而增大系统阻尼, 抑制动态过程中的振荡。由于微分环节仅作用于系统动态过程, 不影响稳态过程, 正好满足 VSG 有功振荡抑制的需求。

通常, 微分控制器需要与比例控制器共同使用, 组成比例微分控制器, 其控制框图如图 7 所示。图中: $R(s)$ 和 $C(s)$ 分别为参考信号和反馈信号; $E(s)$ 和 $M(s)$ 分别为偏差信号和输出信号; K_t 和 τ 分别为比例系数和微分常数。

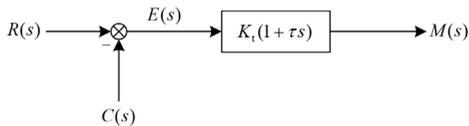


图 7 比例-微分控制器
Fig. 7 Proportional-derivative controller

图 7 中, 偏差变量的比例微分方程表达式为

$$m(t) = K_t e(t) + K_t \tau \frac{de(t)}{dt} \quad (27)$$

式中: $m(t)$ 为输出信号; $e(t)$ 为偏差信号。

当参考信号 $r(t)$ 变化时, PD 控制器中的微分环节立刻作用, 加快输出信号 $m(t)$ 的变化, 从而增大系统阻尼程度, 抑制系统振荡。

为了抑制 VSG 并联系统有功振荡, 加快其动态响应过程, 本文假设在 VSG 输出有功反馈通道上串联一个 PD 控制器, 从而增大系统阻尼, 抑制有功振荡, 其控制框图如图 8 所示。

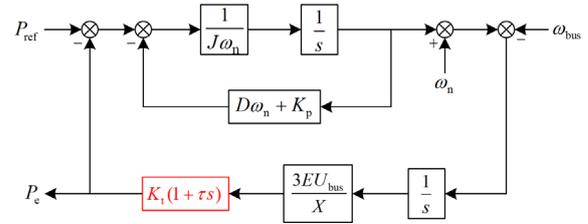


图 8 基于 PD 控制器的改进型 VSG
Fig. 8 Improved VSG based on PD controller

为了不影响 VSG 稳态有功特性, 设置 PD 控制器的比例系数 $K_t = 1$, 即在 VSG 有功反馈回路串联一个 $(1 + \tau s)$ 的比例微分环节。实际工程中, 微分环节的实现较为困难, 且容易给系统引入高频噪声。因此, 本文将采用比例环节来等效实现微分作用。

2.2 VSG 暂态阻尼策略

根据 2.1 节可知, 本文期望在 VSG 有功反馈通道之上, 串联一个 $(1 + \tau s)$ 的比例微分环节。其中, 期望的 VSG 转子运动方程为

$$J\omega_n \frac{d\omega}{dt} = P_m - (\tau \frac{dP_c}{dt} + P_c) - D\omega_n(\omega - \omega_n) \quad (28)$$

移项可得

$$J\omega_n \frac{d\omega}{dt} + \frac{\tau}{J\omega_n} \frac{dP_c}{dt} = P_m - P_c - D\omega_n(\omega - \omega_n) \quad (29)$$

令 $k_d = \frac{\tau}{J\omega_n}$, 进行拉普拉斯变换, 可得

$$J\omega_n s(\omega + k_d P_c) = P_m - P_c - D\omega_n(\omega - \omega_n) \quad (30)$$

进一步, 得到式(31)。

$$\frac{1}{J\omega_n s} [P_m - P_c - D\omega_n(\omega - \omega_n)] - k_d P_c = \omega - \omega_n \quad (31)$$

式(31)可以等效为

$$\Delta\omega = \Delta\omega_s - \Delta\omega_d \quad (32)$$

其中, $\Delta\omega$ 、 $\Delta\omega_s$ 以及 $\Delta\omega_d$ 的表达式为

$$\begin{cases} \Delta\omega = \omega - \omega_n \\ \Delta\omega_s = \frac{1}{J\omega_n s} [P_m - P_c - D\omega_n(\omega - \omega_n)] \\ \Delta\omega_d = k_d P_c \end{cases} \quad (33)$$

式中: $\Delta\omega$ 为 VSG 最终的角频率偏差; $\Delta\omega_s$ 为 VSG

虚拟转子角频率变化量； $\Delta\omega_d$ 为 VSG 角频率校正量。

综上所述，将 VSG 输出有功经过比例环节，反馈至角频率偏差上，能够等效实现 VSG 输出有功串联一个比例微分(PD)环节，从而增大系统阻尼并抑制有功振荡。由于该阻尼环节在系统动态过程初期即对角频率 ω 进行校正，本文将基于频率超前校正(frequency lead correction)的改进型 VSG 称为 FLC-VSG，如图 9 所示。

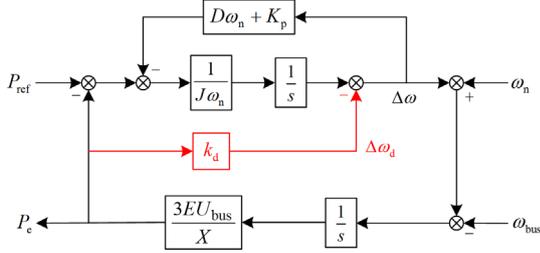


图 9 FLC-VSG 控制框图

Fig. 9 Control block diagram of FLC-VSG

根据图 9，得到 FLC-VSG 转子运动方程为

$$J\omega_n \frac{d\omega}{dt} = P_{ref} - (k_d \frac{dP_e}{dt} + P_e) - (D\omega_n + K_p)(\omega - \omega_n) \quad (34)$$

由式(34)可知，相较于式(4)中的传统虚拟同步机转子运动方程，FLC-VSG 增加了 $k_d \frac{dP_e}{dt}$ 这一项。

由于微分环节能够提前校正输出信号，增大系统阻尼，且不影响系统稳态值。因此，FLC-VSG 能够有效增大系统阻尼，进而抑制有功暂态振荡。

2.3 FLC-VSG 并联系统稳定性分析

根据 2.2 节所述内容，可以得到 FLC-VSG 并联系统的有功环控制结构如图 10 所示。

为了分析 FLC-VSG 并联系统稳定性，需要建立其状态空间模型。根据式(31)可得，FLC-VSG 的转子运动方程小信号表达式为

$$\frac{d(\Delta\omega_i + k_{di}P_{ei})}{dt} = \frac{1}{J_i\omega_n} [P_{refi} - P_{ei} - (D_i\omega_n + K_{pi})\Delta\omega_i] \quad (35)$$

由式(35)可以求出 $(\Delta\omega_i + k_{di}P_{ei})$ 的导数，其可以作为 FLC-VSG 并联系统状态变量。

进一步，可以得到 FLC-VSG 并联系统状态空间模型的表达式为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{A}_2 \mathbf{x}_2 + \mathbf{B}_2 \mathbf{u}_2 \\ \mathbf{y}_2 = \mathbf{C}_2 \mathbf{x}_2 + \mathbf{D}_2 \mathbf{u}_2 \end{cases} \quad (36)$$

其中，状态变量 \mathbf{x}_2 、输入变量 \mathbf{u}_2 以及输出变量 \mathbf{y}_2 的表达式分别为

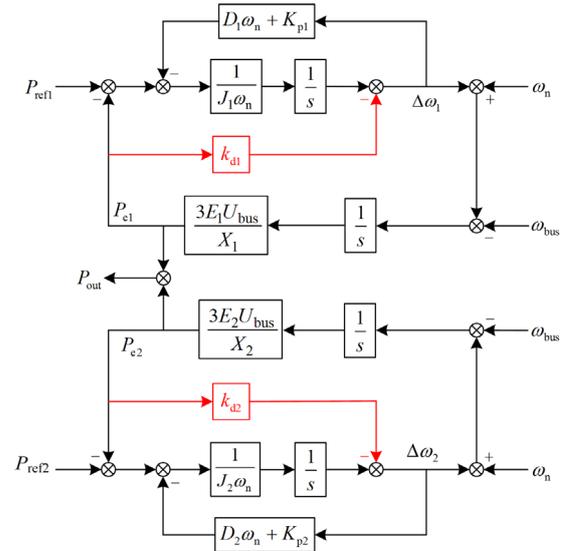


图 10 FLC-VSG 并系统有功环控制结构图

Fig. 10 Active power loop control structure diagram of FLC-VSG parallel system

$$\mathbf{x}_2 = \begin{bmatrix} \Delta\omega_1 + k_{d1}P_{e1} & \Delta\omega_2 + k_{d2}P_{e2} & \Delta\delta_1 - \frac{\Delta P_{load}}{K_1 + K_2} \end{bmatrix}^T \quad (37)$$

$$\mathbf{u}_2 = [\Delta P_{ref1} \quad \Delta P_{ref2} \quad \Delta P_{load}]^T \quad (38)$$

$$\mathbf{y}_2 = [\Delta\omega_1 \quad \Delta\omega_2 \quad \Delta P_{e1} \quad \Delta P_{e2}]^T \quad (39)$$

式(36)中，状态矩阵 \mathbf{A}_2 的表达式为

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} \frac{-K_{p1} + D_1\omega_n}{J_1\omega_n} & 0 & -\frac{K_1}{J_1\omega_n} [1 - k_{d1}(K_{p1} + D_1\omega_n)] \\ 0 & \frac{-K_{p2} + D_2\omega_n}{J_2\omega_n} & \frac{K_1}{J_2\omega_n} [1 - k_{d2}(K_{p2} + D_2\omega_n)] \\ \frac{K_2}{K_1 + K_2} & \frac{-K_2}{K_1 + K_2} & \frac{-K_1 K_2 (k_{d1} + k_{d2})}{K_1 + K_2} \end{bmatrix} \quad (40)$$

由式(40)可知，FLC-VSG 并联系统的状态矩阵 \mathbf{A}_2 依然为 3 阶矩阵，没有增加系统复杂程度。当 $k_{d1} = k_{d2} = 0$ 时，FLC-VSG 与传统 VSG 的状态空间模型完全等效。

此外，式(36)中的控制矩阵 \mathbf{B}_2 、输出矩阵 \mathbf{C}_2 和直接传递矩阵 \mathbf{D}_2 的表达式分别为

$$\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_1\omega_n} & 0 & -\frac{1}{J_1\omega_n} \frac{K_1}{K_1 + K_2} [1 - k_{d1}(K_{p1} + D_1\omega_n)] \\ 0 & \frac{1}{J_2\omega_n} & -\frac{1}{J_2\omega_n} \frac{K_2}{K_1 + K_2} [1 - k_{d2}(K_{p2} + D_2\omega_n)] \\ 0 & 0 & \frac{K_2(-K_1 k_{d1} + K_2 k_{d2})}{(K_1 + K_2)^2} \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -K_1 k_{d1} \\ 0 & 1 & K_1 k_{d2} \\ 0 & 0 & K_1 \\ 0 & 0 & -K_1 \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{K_1 k_{d1}}{K_1 + K_2} \\ 0 & 0 & -\frac{K_2 k_{d2}}{K_1 + K_2} \\ 0 & 0 & \frac{K_1}{K_1 + K_2} \\ 0 & 0 & \frac{K_2}{K_1 + K_2} \end{bmatrix} \quad (43)$$

为了验证 FLC-VSG 抑制并联系统有功振荡的可行性, 通过根轨迹分析系统动态响应性能。将表 1 相关参数代入矩阵 A_2 , 设置有功反馈系数 $k_{d1} = k_{d2}$, 求解 k_d 增大时的系统根轨迹, 如图 11 所示。

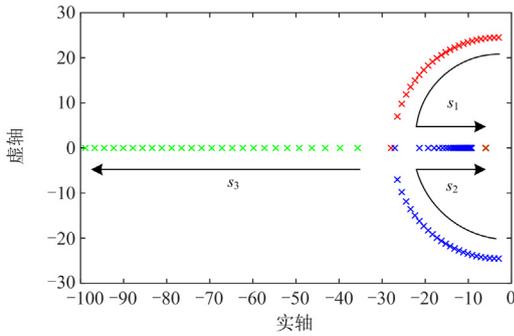


图 11 k_d 增大时的 FLC-VSG 并联系统根轨迹

Fig. 11 Root locus of FLC-VSG parallel system when k_d increases

由图 11 可知, 随着有功反馈系数 k_d 逐渐增大, VSG 并联系统主导极点 s_1 和 s_2 逐渐远离虚轴并靠近负实轴, 系统阻尼比逐渐增大, 从而抑制 VSG 并联系统有功振荡。由于系统极点 s_3 逐渐远离虚轴, 可以忽略其影响。当有功反馈系数 k_d 继续增大时, 系统由欠阻尼状态逐渐过渡到过阻尼状态, 系统动态响应速度变慢。综合考虑有功振荡抑制与动态响应性能, 建议将系统阻尼比设置为 1.2。

3 仿真分析

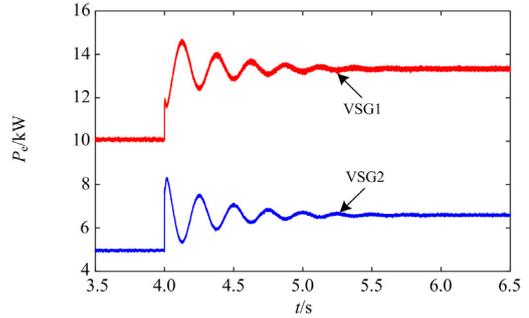
为了验证本文提出的 FLC-VSG 并联系统有功振荡抑制策略的有效性, 在 Matlab/Simulink 中搭建 VSG 并联带负载的仿真模型, 系统参数如表 1 所示。

3.1 负载功率突变

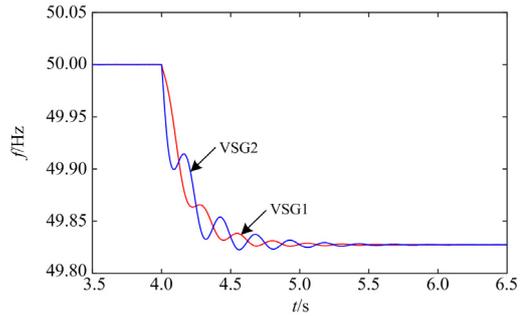
为了验证 FLC-VSG 控制策略在负载功率突变时的有效性, 将仿真工况设置为: 初始时刻 VSG 并

联系统带 15 kW 负载, 4 s 时负载功率突增 5 kW, 观察两台 VSG 输出有功和频率曲线, 分析系统动态响应性能。

图 12 给出了负载突增时传统 VSG(traditional virtual synchronous generator, T-VSG)并联系统的仿真结果。由于两台 VSG 之间的参数差异, VSG1 和 VSG2 输出有功和频率均出现明显的超调和振荡现象。当系统处于稳态时, VSG1 和 VSG2 输出有功值能够按照逆变器容量 2:1 来分配。



(a) T-VSG 并联系统有功响应波形



(b) T-VSG 并联系统频率响应波形

图 12 T-VSG 并联系统的仿真结果

Fig. 12 Simulation results of T-VSG parallel system

当负载功率突变时, T-VSG 并联系统母线电压波形如图 13 所示。在 $t = 4$ s 时负载功率突变, 系统母线电压出现短暂幅值变化, 此后迅速恢复至额定幅值, 验证了 VSG 能够支撑系统电压稳定。

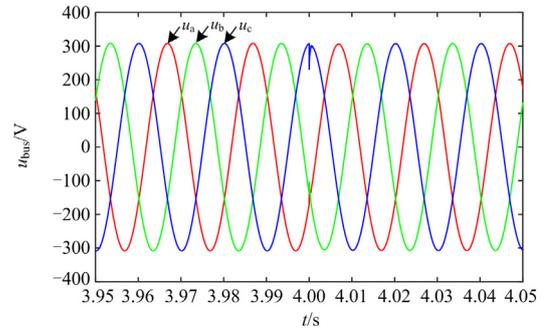


图 13 T-VSG 并联系统的母线电压波形

Fig. 13 Bus voltage waveform of T-VSG parallel system

当负载功率突变时，本文提出的 FLC-VSG 并联系统仿真结果如图 14 所示。

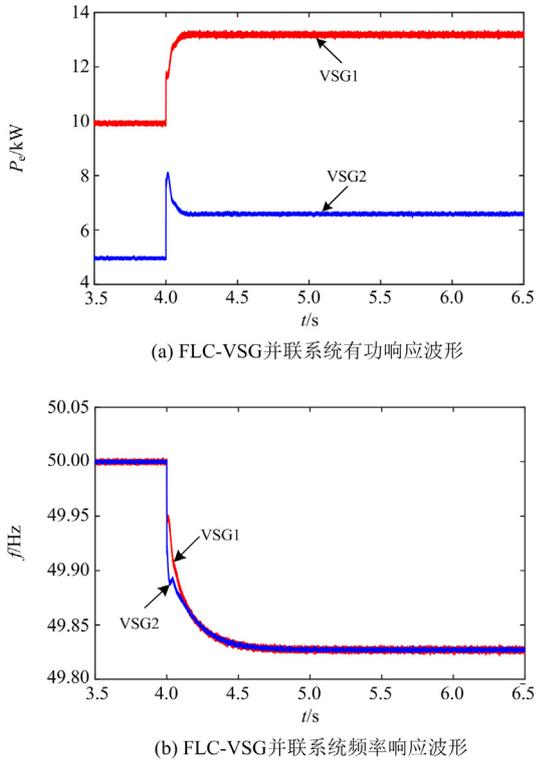


图 14 FLC-VSG 并联系统的仿真结果

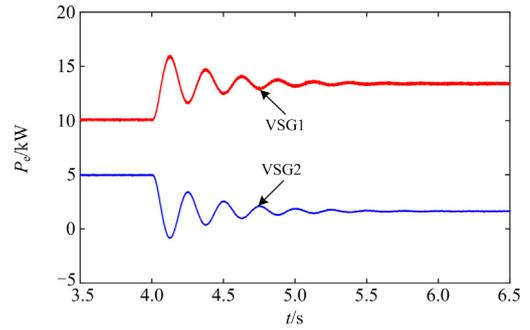
Fig. 14 Simulation results of FLC-VSG parallel system

由图 14 可知，当负载功率突变时，VSG1 和 VSG2 输出有功和频率振荡均得到有效抑制。其中，VSG1 输出有功不存在超调，VSG2 功率超调时间较短，可以忽略其影响。而且，FLC-VSG 与 T-VSG 并联系统的各单机 VSG 有功及频率稳态值保持一致，证明了 FLC-VSG 在抑制输出有功暂态振荡的同时，不影响 VSG 并联系统稳态特性。

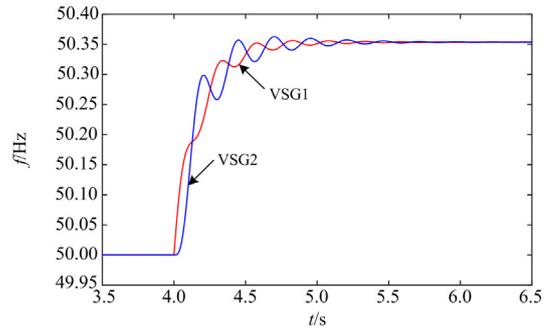
3.2 有功参考值突变

为了验证 FLC-VSG 在有功参考值突变时依然能够抑制系统功率振荡，将仿真工况设置为：初始时刻，VSG 并联系统带 15 kW 负载运行，4 s 时 VSG1 有功参考值 P_{ref1} 由 10 kW 突变为 20 kW，观察两台 VSG 输出有功及频率响应曲线。T-VSG 并联系统的仿真结果如图 15 所示。

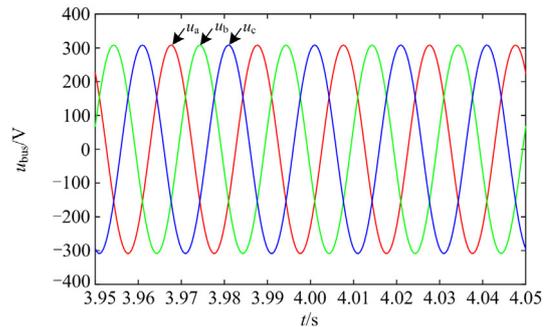
由图 15(a)和图 15(b)可知，VSG1 有功参考值突变时，单机 VSG 输出有功和频率出现暂态振荡。其中，VSG1 输出有功峰值接近 16 kW，有功振荡持续时间较长。VSG 输出有功超调和振荡将使其输出电流出现暂态冲击，进而损坏逆变器开关器件，导致系统停机。由图 15(c)可知，VSG1 有功参考值突变时，系统母线电压能够保持稳定。



(a) T-VSG 并联系统有功响应波形



(b) T-VSG 并联系统频率响应波形

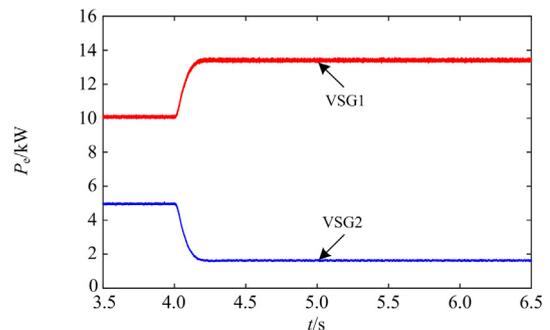


(c) T-VSG 并联系统母线电压波形

图 15 T-VSG 并联系统的仿真结果

Fig. 15 Simulation results of T-VSG parallel system

FLC-VSG 并联系统在系统有功参考值突变时的仿真结果如图 16 所示。



(a) FLC-VSG 并联系统有功响应波形

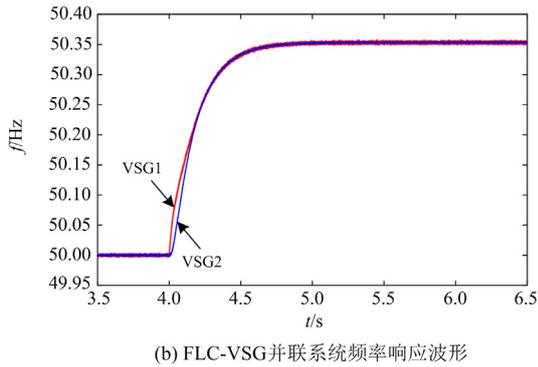


图 16 FLC-VSG 并联系统的仿真结果

Fig. 16 Simulation results of FLC-VSG parallel system

由图 16 可知, VSG1 有功参考值突变时, VSG1 和 VSG2 输出有功和频率能够平滑过渡到新的稳态值, 不存在暂态超调和振荡问题。而且, VSG 输出有功和频率的稳态值与 T-VSG 并联系统保持一致, 不会影响 VSG 并联系统的稳态功频特性。

4 实验验证

为了进一步验证本文提出的 FLC-VSG 控制策略的正确性和有效性, 在 RT-LAB 半实物仿真平台搭建模型, 设置 VSG 并联系统运行工况与仿真模型一致, 观察各单机 VSG 有功动态响应性能。

T-VSG 和 FLC-VSG 并联系统在负载功率突变时的有功波形如图 17 所示。

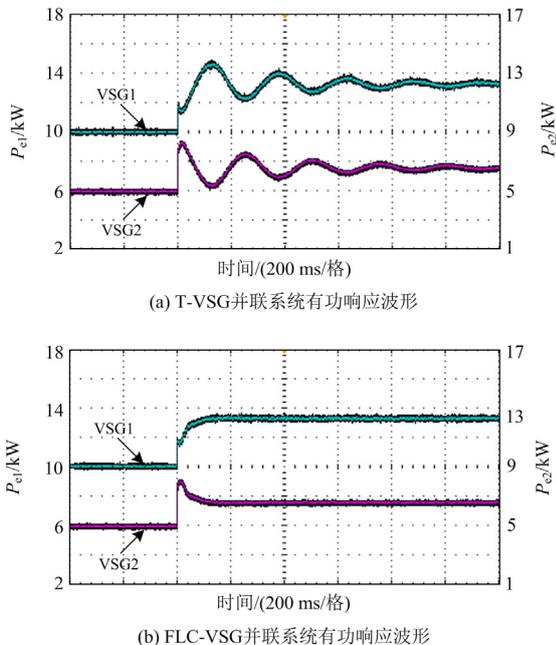


图 17 负载功率突变时的 VSG 并联系统实验结果

Fig. 17 Experimental results of VSG parallel system when load power changes

由图 17(a)可知, 当负载功率突变时, T-VSG 并联系统输出有功存在明显的超调和振荡现象, 不利于系统安全稳定。由图 17(b)可知, FLC-VSG 并联系统在负载功率突变时, 各单机 VSG 输出有功均不存在振荡现象。而且, FLC-VSG 在抑制 VSG 并联系统有功振荡的同时, 没有改变单机 VSG 有功稳态值, 有助于并联系统功率合理分配。

T-VSG 并联系统在有功参考值突变时的实验结果如图 18 所示。当 VSG1 有功参考值突变时, VSG1 和 VSG2 输出有功出现明显的超调和振荡现象, 不利于系统稳定运行。

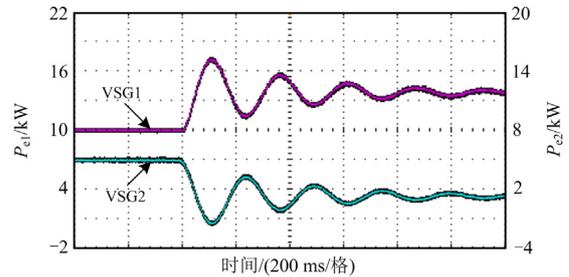


图 18 有功参考值突变时的 T-VSG 并联系统实验结果

Fig. 18 Experimental results of T-VSG parallel system when active reference value changes

FLC-VSG 并联系统在有功参考值突变时的实验结果如图 19 所示。当 VSG1 有功参考值突变时, VSG1 和 VSG2 输出有功均能够平滑过渡到稳态值, 不存在超调和振荡现象, 具有良好的动态响应性能。

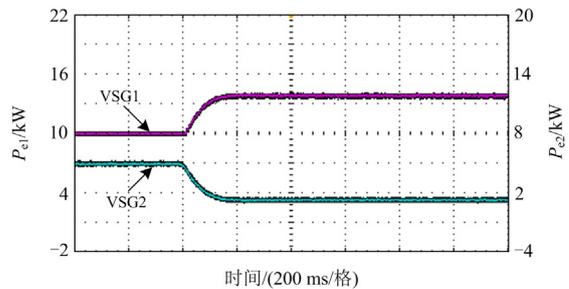


图 19 有功参考值突变时的 FLC-VSG 并联系统实验结果

Fig. 19 Experimental results of FLC-VSG parallel system when active reference value changes

5 结论

针对 VSG 并联系统在外界扰动下存在的有功暂态振荡问题, 本文基于微分超前校正原理并结合 VSG 控制结构, 提出一种基于频率超前校正的 VSG 并联系统功率振荡抑制策略。通过小信号建模分析以及仿真和实验验证, 得出以下结论。

1) 通过建立 VSG 并联系统状态空间模型, 并

结合根轨迹分析相关参数对系统动态性能的影响发现,当负载功率突变时,由于各单机 VSG 的惯量 J 、阻尼系数 D 及传输阻抗之间存在差异,导致各 VSG 动态响应速度不一致,进而引起系统频率和有功振荡问题。

2) 通过增大单机 VSG 的阻尼系数 D ,一定程度上能够抑制并联系统有功振荡,但是由于 D 与有功下垂系数 K_p 耦合,增大阻尼系数将改变 VSG 稳态有功特性,进而影响并联系统功率分配。

3) 本文提出的 FLC-VSG 方案在抑制 VSG 并联系统有功暂态振荡的同时,不影响系统稳态功率分配。而且该方案不需要依赖通信线路,也不使用微分环节,系统结构简单,易于工程实现。

参考文献

- [1] 郑云平, 焦春雷, 亚夏尔·吐尔洪, 等. 基于新能源发电的构网型协调储能控制策略研究[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 65-74.
ZHENG Yunping, JIAO Chunlei, YAXAR·Turgun, et al. Research on grid-forming coordinated energy storage control strategy based on converter-interfaced generation[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 65-74.
- [2] 李成, 张婕, 石轲, 等. 面向风电场的主动支撑电网型分散式储能控制策略与优化配置[J]. 中国电力, 2023, 56(12): 238-247.
LI Cheng, ZHANG Jie, SHI Ke, et al. Control strategy and optimal configuration of active-support-grid type decentralized energy storage system for wind farms[J]. Electric Power, 2023, 56(12): 238-247.
- [3] 刘道兵, 袁野, 李世春, 等. 利用氢储能在含可再生能源系统容量配置综述[J]. 电测与仪表, 2022, 59(12): 1-13.
LIU Daobing, YUAN Ye, LI Shichun, et al. A review of capacity allocation of renewable energy system using hydrogen storage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(12): 1-13.
- [4] 黎立丰, 刘春晓, 朱浩骏, 等. 考虑网络安全约束的可再生能源消纳能力评估方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(4): 162-168.
LI Lifeng, LIU Chunxiao, ZHU Haojun, et al. Absorptive capability evaluation method of renewable energy considering security constraints of power grid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 162-168.
- [5] 刘联涛, 刘飞, 吉平, 等. 储能参与新能源消纳的优化控制策略[J]. 中国电力, 2023, 56(3): 137-143.
LIU Liantao, LIU Fei, JI Ping, et al. Research on optimal control strategy of energy storage for improving new energy consumption[J]. Electric Power, 2023, 56(3): 137-143.
- [6] 苏常胜, 王森, 孙谊嫻, 等. 面向网络节点的新能源高占比系统消纳阻力精细化评估[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 67-75.
SU Changsheng, WANG Sen, SUN Yiqian, et al. Refined evaluation of consumption resistance of system with high proportion of renewable energy for network nodes[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 67-75.
- [7] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2818.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818.
- [8] 涂丹凤, 张代润, 范文, 等. 基于 VSG 的并网变流器 LADRC 策略研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(7): 137-144.
TU Danfeng, ZHANG Dairun, FAN Wen, et al. Research on LADRC strategy of grid-connected converter based on VSG[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(7): 137-144.
- [9] 王亚维, 刘邦银, 段善旭, 等. 虚拟同步控制的暂态特性优化策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 5885-5893.
WANG Yawei, LIU Bangyin, DUAN Shanxu, et al. Research on transient characteristic optimization of virtual synchronization generator control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 5885-5893.
- [10] 徐海珍, 余畅舟, 毛福斌, 等. 基于频率稳定性提升的虚拟惯性优化控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 126-133.
XU Haizhen, YU Changzhou, MAO Fubin, et al. A virtual inertia optimization control strategy based on frequency stability improvement[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 126-133.
- [11] LIU Jia, MIURA Y, BEVRANI H, et al. Enhanced virtual synchronous generator control for parallel inverters in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2268-2277.
- [12] 涂春鸣, 谢伟杰, 肖凡, 等. 多虚拟同步发电机并联系统控制参数对稳定性的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(15): 77-86.
TU Chunming, XIE Weijie, XIAO Fan, et al. Influence analysis of control parameters of parallel system with multiple virtual synchronous generators on stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(15): 77-86.
- [13] 洪灏灏, 顾伟, 黄强, 等. 微电网中多虚拟同步机并联

- 运行有功振荡阻尼控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6247-6254.
- HONG Haohao, GU Wei, HUANG Qiang, et al. Power oscillation damping control for microgrid with multiple VSG units[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6247-6254.
- [14] 许振宇, 陈殷, 石梦璇, 等. 基于一致性算法的并联虚拟同步机系统小信号模型分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(7): 2427-2438.
- XU Zhenyu, CHEN Yin, SHI Mengxuan, et al. Small-signal analysis of consensus-algorithm-based parallel virtual synchronization generators system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2427-2438.
- [15] ELWAKIL M M, EL ZOGHABY H M, SHARAF S M, et al. Adaptive virtual synchronous generator control using optimized bang-bang for islanded microgrid stability improvement[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(4): 953-973.
- [16] THOMAS V, KUMARAVEL S, ASHOK S. Fuzzy controller-based self-adaptive virtual synchronous machine for microgrid application[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3): 2427-2437.
- [17] 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): 2403-2414.
- 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): 2403-2414.
- [18] SHUAI Z K, HUANG W, SHEN Z J, et al. Active power oscillation and suppression techniques between two parallel synchronverters during load fluctuations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 4127-4142.
- [19] 周晖, 王跃, 李明烜, 等. 孤岛并联虚拟同步发电机暂态功率分配机理分析与优化控制[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊 2): 654-663.
- ZHOU Hui, WANG Yue, LI Mingxuan, et al. Analysis and optimal control of transient active power sharing between islanded parallel virtual synchronous generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S2): 654-663.
- [20] LI M, YU P, HU W, et al. Phase feedforward damping control method for virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(8): 9790-9806.
- [21] 李明烜, 王跃, 徐宁一, 等. 基于带通阻尼功率反馈的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(10): 2176-2185.
- LI Mingxuan, WANG Yue, XU Ningyi, et al. Virtual synchronous generator control strategy based on bandpass damping power feedback[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(10): 2176-2185.
- [22] 石荣亮, 兰才华, 王国斌, 等. 基于有功前馈补偿的储能 VSG 并网有功振荡抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 118-126.
- SHI Rongliang, LAN Caihua, WANG Guobin, et al. Grid-connected active power oscillation suppression strategy of an energy storage VSG based on active power feed-forward compensation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 118-126.
- [23] 江世明, 唐杰. 基于暂态阻尼增强的改进 VSG 控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 144-154.
- JIANG Shiming, TANG Jie. Improved VSG control strategy based on transient damping enhancement[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 144-154.
- [24] 兰征, 刘祖潭, 何东, 等. 基于暂态电磁功率补偿的 VSG 并联系统有功振荡抑制策略[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 23-33.
- LAN Zheng, LIU Zutan, HE Dong, et al. Active oscillation suppression strategy of paralleled virtual synchronous generators based on transient electromagnetic power compensation[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 23-33.
- [25] 朱军, 袁亚飞, 刘鹏辉, 等. 基于功率微分项的双 VSG 有功功率振荡抑制策略[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(1): 177-188.
- ZHU Jun, YUAN Yafei, LIU Penghui, et al. Active power oscillation suppression strategy for dual-VSG grid based on power differential term[J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(1): 177-188.
- [26] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
-
- 收稿日期: 2023-12-18; 修回日期: 2024-05-09
- 作者简介:
- 苗长新(1976—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电能质量与控制、微电网优化运行控制技术; E-mail: miaochangxin@163.com
- 赵文鹏(1999—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源并网控制技术。E-mail: zhaowenpeng@163.com
- (编辑 张颖)