DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201512

基于参数自适应的直流微源虚拟发电机控制策略

张勤进，张瀚文，刘彦呈，陈 龙，胡王宝

(大连海事大学轮机工程学院，辽宁 大连 116026)

摘要：针对分布式电源波动及负载功率突变引起直流微电网母线电压大幅波动的问题，传统虚拟直流电机控制通过模拟直流电机外特性，可抑制母线电压波动，但动态响应较差。对此，提出一种参数自适应的虚拟直流发电机控制策略。以 Buck/Boost 变换器作为研究对象，结合下垂控制将虚拟直流发电机应用于多变换器并联系统中。建立其小信号模型，分析关键控制参数变化对系统稳定性的影响，并给出惯性系数和阻尼系数自适应调节方程。最后，搭建仿真模型及 StarSim HIL 实验平台。结果表明所提控制策略在有效抑制直流母线电压波动的同时，使系统具有较快的动态响应速度。

关键词：直流微电网；母线电压；虚拟直流发电机；自适应；小信号模型

Control strategy for a DC micro source virtual generator based on adaptive parameters

ZHANG Qinjin, ZHANG Hanwen, LIU Yancheng, CHEN Long, HU Wangbao

(College of Marine Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: There can be large fluctuations in a DC microgrid bus voltage caused by distributed power fluctuations and sudden changes in load power. Traditional virtual DC motor control can suppress bus voltage fluctuations by simulating the external characteristics of DC motors, but the dynamic response is poor. Because of this, a parameter adaptive virtual DC generator control strategy is proposed. Taking the Buck/Boost converter as the research object, combined with droop control, a virtual DC generator is applied to the multi-converter parallel system; its small signal model is established, and the influence of the key control parameter changes on system stability is analyzed, and the adaptive adjustment equations of inertia coefficient and damping coefficient are derived. Finally, a simulation model and StarSim HIL experimental platform are built. The results show that the proposed control strategy effectively suppresses the DC bus voltage fluctuations and enables the system to have a faster dynamic response.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51709028 and No. 51979021), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 3132019317), and High-level Talents Innovation Support Project of Dalian City (No. 2019RQ008).

Key words: DC microgrid; bus voltage; virtual DC generator; self-adaptive; small signal model

0 引言

随着化石能源的短缺以及环境问题的日益严峻，以新能源发电为主的分布式发电技术得到了广泛关注。相比交流微电网，直流微电网更适合大规模的新能源接入，且可以减少成本、降低损耗、提高可控性和可靠性、无频率相位等问题，其发展前景也日益广阔[1-6]。但在直流微电网中，各分布式单元均通过缺少惯性和阻尼的电力电子变换器接入公共母线，当微电网内的分布式电源发生波动，以及负载功率发生突变时，均会对直流母线电压造成较大影响，严重影响电能质量，不利于直流微电网的稳定运行[7-8]。因此，通过控制技术提高直流微电网的惯性，减小母线电压的波动对直流微电网[9]的稳定运行具有重要意义[10-11]。

虚拟直流电机(Virtual DC Machine, VDCM)控制通过模拟直流电机的外特性，为系统提供额外的惯性和阻尼支撑，可分为虚拟直流发电机和虚拟直流电动机两类[12]。文献[12-15]提出虚拟直流电机控制，并将其应用在储能以及负荷侧，抑制了母线电

基金项目：国家自然科学基金项目资助(51709028，51979021)；中央高校基本科研业务费专项资金(3132019317)；大连市高层次人才创新支持计划项目资助(2019RQ008)

压波动。文献[16]在能量路由器的交直流侧采用虚拟同步发电机控制[17]，在直流系统中模拟出交流系统具备的惯性和阻尼。文献[18-19]提出了一种改进的具有储能接口的 VDCM 控制策略，在传统的 VDCM 控制中，通过在前馈通道中加入差动补偿，可以提高直流微电网对负载变化和可再生能源干扰的弹性。然而，上述文献均未分析 VDCM 控制的动态响应以及参数设计对系统稳定性的影响。文献[20]分析了 VDCM 控制下惯性系数和阻尼系数对系统稳定性的影响，证明加入 VDCM 控制后提升了系统的稳定性，但未实现对参数的灵活控制，导致动态特性较差。对此，文献[21-23]考虑参数自适应的虚拟惯性控制策略，改善了这一问题，但只对单台变换器进行了控制，且控制策略较为复杂。

在此基础上，本文以 Buck/Boost 变换器为研究对象，将虚拟直流发电机控制应用到直流微电网多变换器并联系统中，详细分析了关键控制参数对系统稳定性的影响，并提出一种参数自适应控制策略，改善系统动态特性并降低了已有算法的复杂度。最后，通过仿真和实验验证了所提控制策略的有效性。

1　虚拟直流发电机控制策略

1.1　虚拟直流发电机模型

图 1 为虚拟直流发电机模型，Buck/Boost 变换器可等效为一个二端口网络，前端接入分布式电源，后端接入直流母线，其等效的二端口网络可模拟直流发电机外特性。

图中：E 为电枢电动势；U 为发电机端电压；I_a 为电枢电流；R_a 为电枢电阻；U_1 为电源输出电压；U_2 为变换器输出电压；I_1 为电源输出电流；I_2 为变换器输出电流；L、R 为变换器的滤波电感及其寄生电阻；C 为电容；S_1、S_2 为开关管。

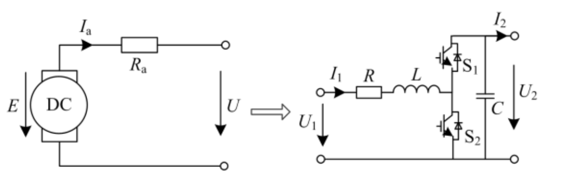


图 1　虚拟直流发电机模型

Fig. 1 Virtual DC generator model

直流发电机的机械方程为

$$\begin{cases} J\dfrac{\mathrm{d}\omega_e}{\mathrm{d}t} = T_m - T_e - D(\omega_e - \omega_{e0})/p \\ T_e = \dfrac{P_e}{\omega_e}p \end{cases} \tag{1}$$

式中：$\omega_e=\omega p$，ω 为实际机械角速度；ω_{e0} 为额定电角速度，$\omega_{e0}=\omega_0 p$，ω_0 为额定机械角速度；J 为转动惯量；D 为阻尼系数；T_m 为机械转矩；T_e 为电磁转矩；ω_e 为实际电角速度；p 为直流发电机极对数；电磁功率 $P_e=EI_a$。

电枢方程为

$$\begin{cases} U = E - I_a R_a \\ E = C_T \Phi \omega \end{cases} \tag{2}$$

式中：C_T 为转矩系数；Φ 为磁通。采用上述虚拟直流发电机模型对变换器进行控制时，$U_2=U$，$I_2=I_a$，变换器将具备与直流发电机一致的外特性，可增加系统的惯性和阻尼，提高母线电压的稳定性。

1.2　虚拟直流发电机控制策略

图 2 为引入虚拟直流发电机控制后的并联系统整体框图，分布式电源经 Buck/Boost 变换器接入直流母线，负载侧接入恒功率负载(Constant Power Load, CPL)，R_{line1}、R_{line2} 为源侧等效线路阻抗，L_1、C_1 为负载侧滤波电感和电容。

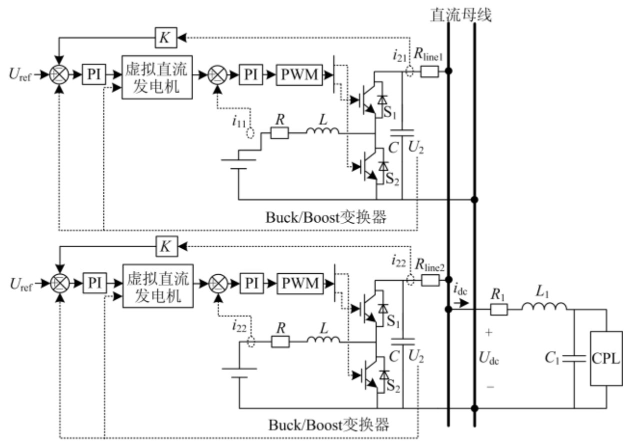
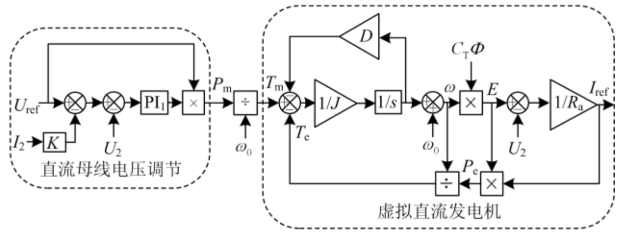


图 2　并联系统整体控制框图

Fig. 2 Overall control block diagram of parallel system

为增强直流微电网的惯性与阻尼，抑制扰动引起的母线电压波动，在传统下垂控制的基础上，引入虚拟直流发电机控制，作用于电压环与电流环之间，K 为下垂控制系数，具体控制如图 3 所示。

图 3 中，母线电压参考值 U_{ref} 经过电压调节后得到机械功率 P_m，再经过虚拟直流发电机环节得到



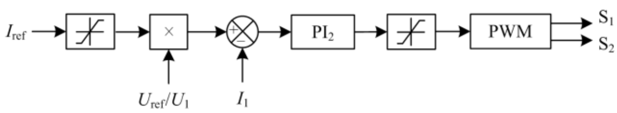


图 3 加入虚拟直流发电机后的控制框图

Fig. 3 Control block diagram after adding virtual DC generator

变换器输出电流参考值 I_{ref}，根据功率平衡原则利用 U_{ref}/U_1 将 I_{ref} 转换为输入电流参考值，最后通过电流环的 PI 控制器及 PWM 调制得到所需的控制信号。

2 小信号稳定性分析

2.1 Buck/Boost 变换器小信号模型

本文所研究的并联系统只考虑能量由源侧流向负荷侧，故以 Buck/Boost 变换器 Boost 工作模式为例进行分析，其小信号等效电路如图 4 所示，其中，d' 代表 $1-d$，d 为占空比；$\hat{u}_1(t)$ 和 $\hat{u}_2(t)$ 分别为电源输出电压小扰动信号和变换器输出电压小扰动信号，$\hat{i}_1(t)$ 和 $\hat{i}_2(t)$ 分别为电感电流小扰动信号和变换器输出电流小扰动信号，$\hat{d}(t)$ 为占空比小扰动信号[18]。

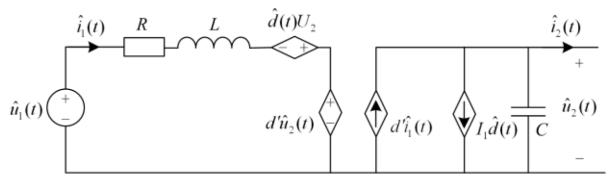


图 4 Buck/Boost 变换器小信号等效电路

Fig. 4 Small signal equivalent circuit of Buck/Boost converter

建立其小信号模型如式(3)所示。

$$\begin{cases} L\dfrac{\mathrm{d}\hat{i}_1(t)}{\mathrm{d}t} = \hat{u}_1(t) - R\hat{i}_1(t) - (1-d)\hat{u}_2(t) + \hat{d}(t)U_2 \\ C\dfrac{\mathrm{d}\hat{u}_2(t)}{\mathrm{d}t} = (1-d)\hat{i}_1(t) - \hat{i}_2(t) - \hat{d}(t)I_1 \end{cases} \tag{3}$$

由图 3 和图 4 可得加入虚拟直流发电机后的变换器小信号模型，如图 5 所示。

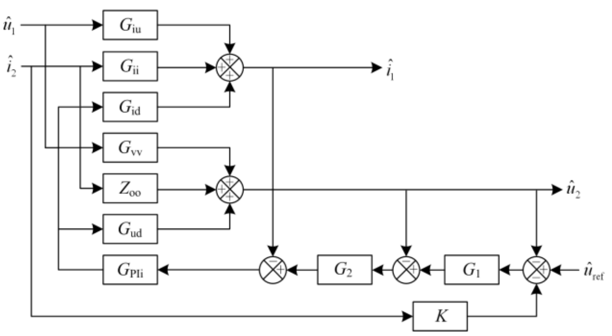


图 5 加入虚拟直流发电机后的小信号模型

Fig. 5 Small signal model after adding virtual DC generator

图 5 中主要传递函数推导结果如下：

$$G_{\mathrm{ii}} = \frac{\hat{i}_1(s)}{\hat{i}_2(s)}\bigg|_{\hat{u}_1(s)=0,\hat{d}(s)=0} = \frac{d'}{CLs^2 + CRs + d'^2} \tag{4}$$

$$G_{\mathrm{id}} = \frac{\hat{i}_1(s)}{\hat{d}(s)}\bigg|_{\hat{u}_1(s)=0,\hat{i}_2(s)=0} = \frac{I_1 d' + CU_2 s}{CLs^2 + CRs + d'^2} \tag{5}$$

$$Z_{\mathrm{oo}} = \frac{\hat{u}_2(s)}{\hat{i}_2(s)}\bigg|_{\hat{u}_1(s)=0,\hat{d}(s)=0} = \frac{-(Ls+R)}{CLs^2 + CRs + d'^2} \tag{6}$$

$$G_{\mathrm{ud}} = \frac{\hat{u}_2(s)}{\hat{d}(s)}\bigg|_{\hat{u}_1(s)=0,\hat{i}_2(s)=0} = \frac{d'U_2 - I_1(Ls+R)}{CLs^2 + CRs + d'^2} \tag{7}$$

$$G_1 = \frac{U_{\mathrm{ref}} C_{\mathrm{T}} \Phi R_{\mathrm{a}} (k_{\mathrm{pu}} s + k_{\mathrm{iu}})}{JR_{\mathrm{a}}\omega_0 s^2 + (C_{\mathrm{T}}^2 \Phi^2 \omega_0 + DR_{\mathrm{a}}\omega_0)s} \tag{8}$$

$$G_2 = \frac{U_{\mathrm{ref}}}{R_{\mathrm{a}} U_1} \tag{9}$$

$$G_{\mathrm{PIi}} = k_{\mathrm{pi}} + \frac{k_{\mathrm{ii}}}{s} \tag{10}$$

式中：k_{pi}、k_{ii} 为电流 PI 控制器的比例系数和积分系数；k_{pu}、k_{iu} 为电压 PI 控制器的比例和积分系数；Z_{oo} 为变换器开环输出阻抗；$G_1(s)$为电枢电动势偏差 ΔE 对母线电压偏差 ΔU 的传递函数。

2.2 小信号稳定性分析

由小信号模型可以得到加入虚拟直流发电机控制后的闭环传递函数为

$$G_{\mathrm{uc}}(s) = \frac{H}{1 + G_{\mathrm{PIi}}(s)G_{\mathrm{id}}(s) + G_2(s)G_{\mathrm{PIi}}(s)G_{\mathrm{ud}}(s) + H} \tag{11}$$

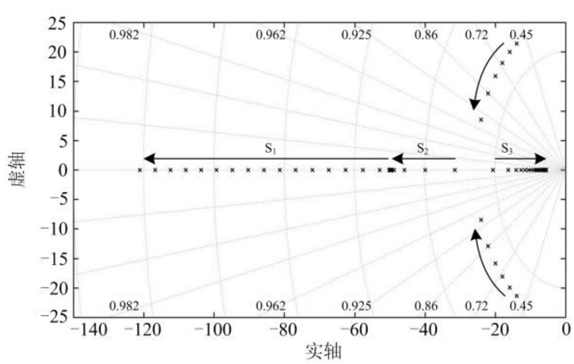
变换器闭环等效输出阻抗为

$$Z_{\mathrm{out}}(s) = \frac{(G_{\mathrm{PIi}}(s)G_{\mathrm{id}}(s)+1)Z_{\mathrm{oo}}(s) - KH - G_{\mathrm{ii}}(s)G_{\mathrm{PIi}}(s)G_{\mathrm{ud}}(s)}{1 + G_{\mathrm{PIi}}(s)G_{\mathrm{id}}(s) + G_2(s)G_{\mathrm{PIi}}(s)G_{\mathrm{ud}}(s) + H} \tag{12}$$

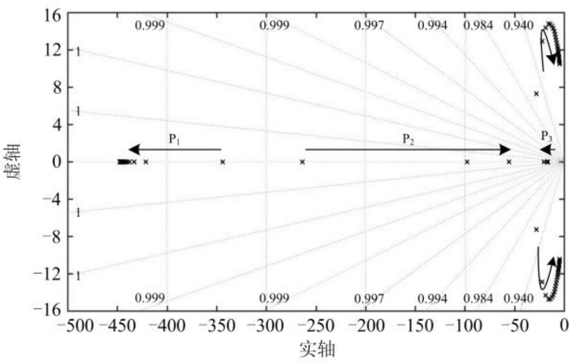
其中：

$$H = G_1(s)G_2(s)G_{\mathrm{PIi}}(s)G_{\mathrm{ud}}(s) \tag{13}$$

通过式(11)绘制 J=0.05 且 D 取 0.2~5 的闭环主导极点图，以及 D=1 且 J 取 0.05~0.25 的闭环主导极点图，如图 6(a)和图 6(b)所示。



(a) J=0.05且D取0.2~5时的闭环主导极点图



(b) D=1且J由0.05至0.25时的闭环主导极点图

图 6 闭环主导极点图

Fig. 6 Closed loop dominant pole graph

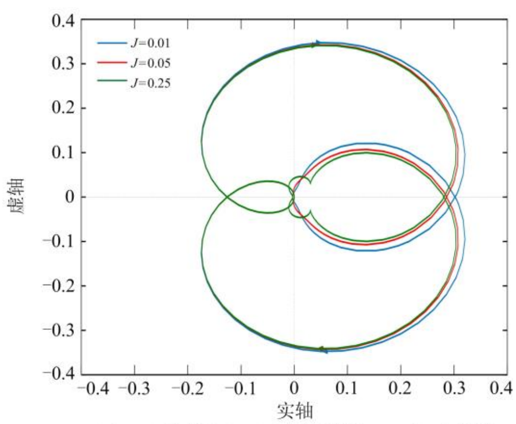
当主导极点靠近零点时，系统稳定性降低；当主导极点远离零点时，系统稳定性增强。由图 6(a)可知，当 J 取 0.05 且 D 取 1.4~3.4 时，系统稳定性较好。由图 6(b)可知，当 D 取 1 时且 J 取 0.05~0.15 时，系统稳定性较好。

在对单台变换器稳定性分析的基础上，为进一步分析参数 J 和 D 对并联系统稳定性的影响，采用 Middlebrook 阻抗比判据，即通过环路增益 $T_m=Z_o/Z_i$ 判断系统的稳定性，当 T_m 的 Nyquist 曲线不包围(–1,0)时，系统处于稳定状态。$Z_o=(Z_{out}+R_{line1})//(Z_{out}+R_{line2})$为源侧并联等效输出阻抗；$Z_i$ 为负载侧等效输入阻抗，即图 2 中直流母线右侧电路的等效阻抗。

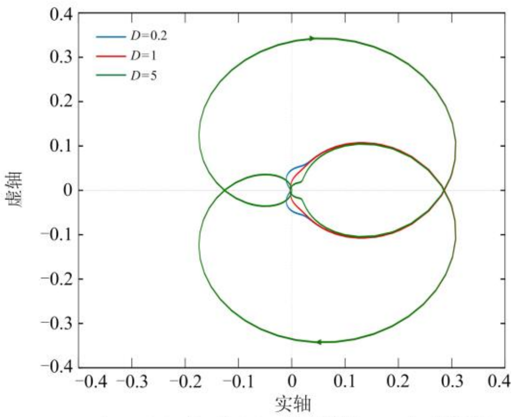
$$Z_i(s)=\frac{L_1C_1R_{cpl}s^2+(R_1C_1R_{cpl}+L_1)s+R_1+R_{cpl}}{1+C_1R_{cpl}s} \tag{14}$$

式中，$R_{cpl}=-U_{dc}^2/P_{cpl}$ 为具有负阻抗特性的恒功率负载阻值，P_{cpl} 为负载功率。参数 J 和 D 变化时系统的 Nyquist 曲线如图 7 所示。

从图中可以看出，系统的 Nyquist 曲线不包围(–1,0)点且距其较远，具有良好的稳定性。当参数变化时，Nyquist 曲线距(–1,0)点的位置无明显变化，故惯性系数 J 和阻尼系数 D 在一定范围内的变化不会对并联系统的稳定性造成影响。



(a) D=1且J取0.01~0.25时系统的Nyquist曲线图



(b) J=0.05且D取0.2~5时系统的Nyquist曲线图

图 7 并联系统 Nyquist 曲线图

Fig. 7 Nyquist curve of parallel system

3 虚拟直流发电机参数自适应控制

传统的虚拟直流发电机控制策略虽然可以在扰动时抑制直流母线电压波动，但由于其惯性系数 J 和阻尼系数 D 是固定不变的，会导致动态响应较差。为解决该问题，提出了基于参数自适应的虚拟直流发电机控制策略。

由于增大 J 和 D 可为系统提供额外的惯性和阻尼，进而抑制扰动信号对母线电压的影响，故在母线电压初始波动阶段，采用较大的 J 和 D 来为系统提供较大的惯性和阻尼支撑。在母线电压恢复阶段，采用较小的 J 和 D 以获得较快的动态响应速度。基于该控制思想，在 J 和 D 部分引入参数自适应控制，其余控制部分与图 3 一致。

虚拟直流发电机参数自适应调节方程为

$$J=\begin{cases} J_0 & \left|\dfrac{\mathrm{d}U_2}{\mathrm{d}t}\right|<k_0 \\ J_0+A\arctan\left|\dfrac{\mathrm{d}U_2}{\mathrm{d}t}\right| & \left|\dfrac{\mathrm{d}U_2}{\mathrm{d}t}\right|\geqslant k_0 \end{cases} \tag{15}$$

$$D=\begin{cases} D_0 & \left|\dfrac{\mathrm{d}U_2}{\mathrm{d}t}\right|<k_0 \\ D_0+B\arctan\left|\dfrac{\mathrm{d}U_2}{\mathrm{d}t}\right| & \left|\dfrac{\mathrm{d}U_2}{\mathrm{d}t}\right|\geqslant k_0 \end{cases} \tag{16}$$

式中：J_0 和 D_0 为设置的惯性系数和阻尼系数初始参考值；A 和 B 为调节系数；$\left|\mathrm{d}U_2/\mathrm{d}t\right|$ 为直流母线电压变化率的绝对值，反正切函数可以对其进行限幅；k_0 为设置的阈值。

以负载功率突增为例，直流母线电压变化率绝对值如图 8 所示，t_0~t_1 阶段为母线电压跌落阶段，t_1~t_2 阶段为母线电压恢复阶段。设置阈值 k_0 使其值高于恢复阶段的 $|\mathrm{d}U_2/\mathrm{d}t|$，在所确定的 t_3~t_4 时段，令惯性系数 J 和阻尼系数 D 进行自适应调节，增加系统惯性和阻尼，抑制母线电压因外部扰动产生的波动；其余时段选取较小的定值 J_0 和 D_0，由于 t_4 时刻还未进入恢复阶段，提前减小 J 值和 D 值可进一步加快动态响应速度。

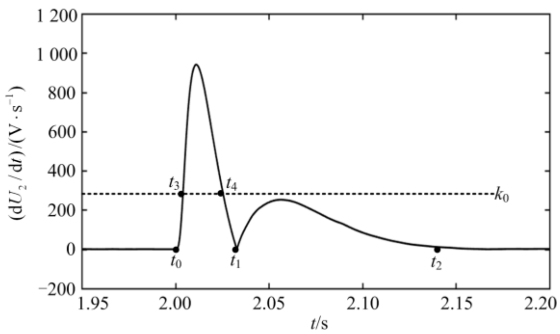


图 8　直流母线电压变化率绝对值图

Fig. 8 Absolute value diagram of DC bus voltage change rate

根据稳定性分析内容可知，惯性系数 J 和阻尼系数 D 变化时不会对并联系统的稳定性造成影响。对于单台变换器，J 取 0.05~0.15 且 D 取 1.4~3.4 时稳定性更好，为使参数自适应变化时保持在上述取值范围内，且充分考虑动态响应特性后，本文取初始惯性系数 J_0=0.05，初始阻尼系数 D_0=1.5，令参数调节范围保持在 $0.05 \leqslant J \leqslant 0.15$、$1.5 \leqslant D \leqslant 3.4$，经分析选取调节系数 A=0.06、B=1.3。

4　仿真分析

为验证所提参数自适应虚拟直流发电机控制策略的有效性，在 Matlab/Simulink 中搭建了相应的并联系统仿真模型，对传统下垂控制、虚拟直流发电机控制以及改进的参数自适应控制进行对比分析，仿真参数如表 1 所示。

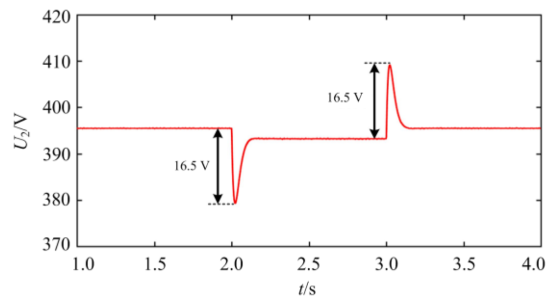
表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

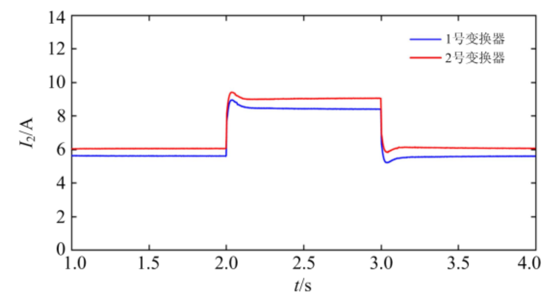
参数	数值	参数	数值
电源电压 U_1/V	240	额定角速度 ω_0/(rad s^{-1})	314
参考电压 U_{ref}/V	400	($C_\mathrm{T}\Phi$)/(Nm A^{-1})	1.3
下垂系数 K	0.3	电枢电阻 R_a/Ω	0.5
开关频率 f/kHz	20	惯性系数 J_0/(kg m^2)	0.05
电容 C/mF	1	阻尼系数 D_0	1.5
电感 L/mH	1.5	调节系数 A	0.06
线路阻抗 R_{line1}/Ω	0.5	调节系数 B	1.3
线路阻抗 R_{line2}/Ω	0.45	阈值 k_0	270

4.1　负载功率突变仿真分析

为研究恒功率负载功率突变对直流母线电压的影响，初始时刻接入 4.4 kW 负载，在 t=2 s 时负载功率突增到 6.4 kW，在 t=3 s 时又突减回 4.4 kW。传统下垂控制下直流母线电压及变换器输出电流动态响应如图 9(a)和图 9(b)所示，初始直流母线电压稳态值设定为 400 V，由于下垂控制特性，输出电压略有跌落，仿真结果为 396 V。可见采用传统下垂控制，虽然动态响应较快，经过约 0.12 s 后进入稳态，但母线电压波动幅值约为 16.5 V，变换器输出电流超调约为 0.7 A，较大的波动不利于直流微电网的稳定运行。



(a) 负载功率突变时直流母线电压动态响应图

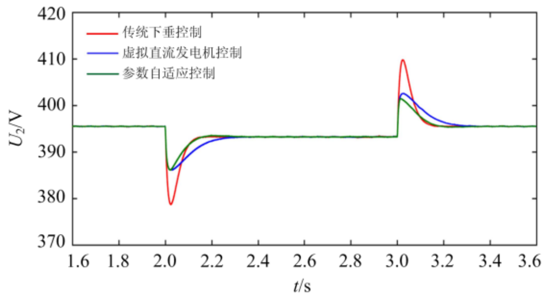


(b) 负载功率突变时变换器输出电流动态响应图

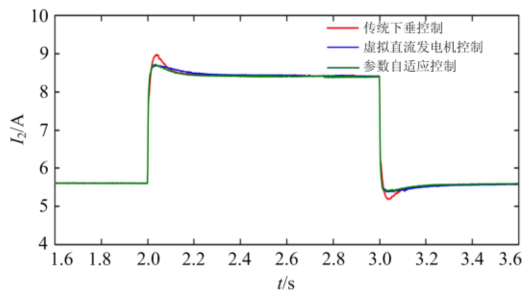
图 9　负载功率突变时传统下垂控制策略下动态响应

Fig. 9 Dynamic response of traditional droop control strategy under load power mutation

变换器采用虚拟直流发电机控制和所提参数自适应控制后，与传统下垂控制的仿真对比如图 10(a)和图 10(b)所示。负载功率突增时，采用虚拟直流发电机控制后，母线电压波动约为 9 V，变换器输出电流超调约为 0.4 A，但动态响应较慢，经过约 0.3 s 才进入稳态。而加入所提参数自适应控制策略后，母线电压波动及变换器输出电流超调抑制效果不变，但动态响应明显加快，经过约 0.12 s 便恢复至稳态，惯性系数 J 和阻尼系数 D 的动态调节过程如图 11(a)和图 11(b)所示。负载功率突减时，各控制策略效果与负载功率突增时一致。



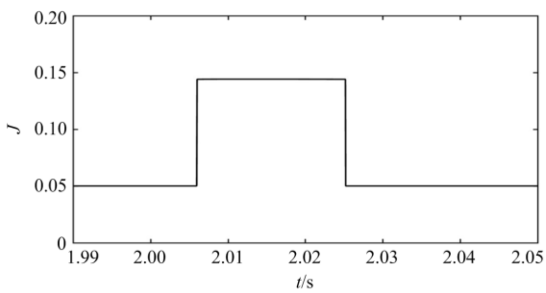
(a) 负载功率突变时直流母线电压动态响应图



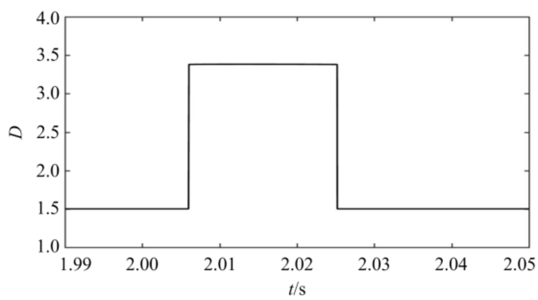
(b) 负载功率突变时1号变换器输出电流动态响应图

图 10　负载功率突变时不同控制策略下的动态响应

Fig. 10 Dynamic response of different control strategies under sudden load power change



(a) 惯性系数J动态变化图



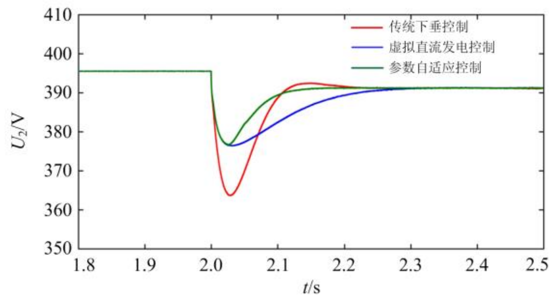
(b) 阻尼系数D动态变化图

图 11　功率突增时参数动态调节图

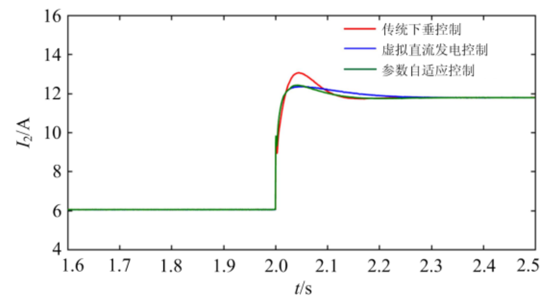
Fig. 11 Dynamic adjustment chart of parameters in case of sudden increase of power

4.2 分布式电源波动仿真分析

当分布式电源发生波动时，直流母线电压也会产生波动，以并联系统中第 1 台电源发生故障停止运行为例，如图 12(a)和图 12(b)所示。传统下垂控制策略下直流母线电压跌落幅值约为 32 V，变换器输出电流超调约为 1.3 A，经过约 0.2 s 进入稳态。采用虚拟直流发电机控制后，母线电压跌落约为 18.5 V，变换器输出电流超调约为 0.6 A，经过约 0.3 s 进入稳态。而加入所提参数自适应控制策略后，经过约 0.15 s 便恢复至稳态，且抑制效果不变。



(a) 分布式电源故障时直流母线电压动态响应图



(b) 分布式电源故障时2号变换器输出电流动态响应图

图 12　分布式电源故障时不同控制策略下的动态响应

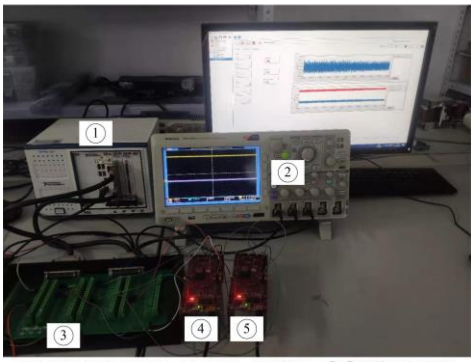
Fig. 12 Dynamic response of distributed generation under different control strategies

由仿真结果可知，应用所提参数自适应虚拟直流发电机控制后，在负载功率突变以及分布式电源波动时，均可在有效抑制母线电压波动及变换器输出电流超调的同时，明显提高系统的动态响应速度。

5　实验验证

为进一步验证所提控制策略的有效性，搭建了基于 HIL 的实验平台，如图 13 所示。直流微电网的主电路部分包括 Buck/Boost 变换器、电源、电感电容、线路阻抗、恒功率负载等，由基于 NI-PXIe-FPGA-7846R 的实时在环系统硬件模拟，各变换器的控制器用 DSP 板控制。

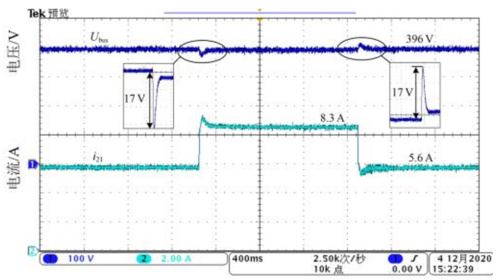
图 14 给出了负载功率先突增至 6.4 kW 再突减至 4.4 kW 时，三种控制策略下直流母线电压及变换器输出电流的实验波形，由于两台变换器输出电流动态特性基本一致，图中仅显示 1 号变换器输出电流以便观察。



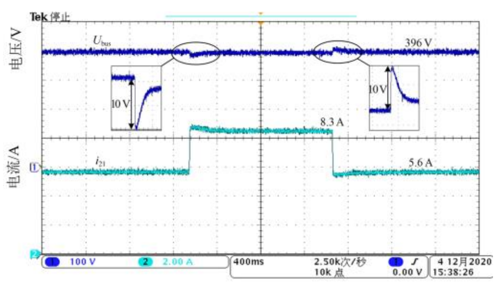
①硬件在环实时仿真器 ②示波器 ③IO接口 ④⑤变换器控制器

图 13 基于 HIL 的实验平台

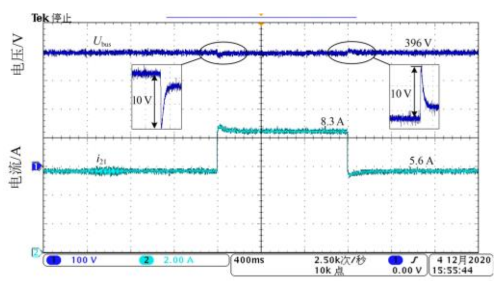
Fig. 13 Experiment platform based on HIL



(a) 传统下垂控制策略



(b) 虚拟直流发电机控制策略



(c) 参数自适应控制策略

图 14 负载功率突变时不同控制策略下实验波形

Fig. 14 Experimental waveforms of different control strategies under load power steps

在图 14 的电压放大图中，每格代表 5 V，从图中可以看出在传统下垂控制策略下，电压波动幅值约为 17 V，电流超调约为 0.7 A，动态响应较快。在虚拟直流发电机及参数自适应控制策略下，电压波动幅值均为 10 V 左右，电流超调约 0.4 A，但前者动态响应较慢，后者响应速度明显加快，与仿真结果基本一致。

实验结果表明，所提参数自适应控制策略下，既可对电压、电流产生的波动进行有效抑制，又使系统具备较快的动态响应速度。

6　结论

本文以直流微电网 Buck/Boost 变换器为研究对象，分析了采用传统虚拟直流发电机控制下惯性系数和阻尼系数对系统稳定性的影响，并针对该控制策略动态特性较差的问题，提出了基于参数自适应的虚拟直流发电机控制策略，给出了自适应调节方程。最后，仿真及实验表明，所提控制策略在有效抑制并联系统母线电压波动及变换器输出电流超调的同时，明显地提升了系统动态响应速度。

本文针对系统动态性能进行了改善，但未同时解决因线路阻抗差异导致的变换器输出电流分配不均的问题，下一步可在此方面进行研究。

参考文献

[1] FRANCES-ROGER A, ANVARI-MOGHADDAM A, RODRIGUEZ-DIAZ E, et al. Dynamic assessment of COTS converters-based DC integrated power systems in electric ships[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(12): 5518-5529.

[2] 聂永刚，李俊青，韩爽，等. 基于虚拟惯量的 DC 换流器并联直流配电网控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 19-26.
NIE Yonggang, LI Junqing, HAN Shuang, et al. Control strategy for parallel DC distribution network of DC converters based on virtual inertia[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 19-26.

[3] ANAND S, FERNANDES B G, GUERRERO J. Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low-voltage DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 28(4): 1900-1913.

[4] DRAGICEVI T, LU X, VASQUEZ C J, et al. DC microgrids—part I: a review of control strategies and stabilization techniques[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7): 4876-4891.

[5] 张勤进，张博，刘彦呈，等. 基于低频电流注入的船舶直流微电网线路阻抗检测[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 134-140.
ZHANG Qinjin, ZHANG Bo, LIU Yancheng, et al. A line impedance detection of a ship DC microgrid based on low frequency current injection[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8): 134-140.

[6] BUTICCHI G, BOZHKO S, LISERRE M, et al.

On-board microgrids for the more electric aircraft-technology review[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(7): 5588-5599.

[7] 宋春宁, 付栋, 李欣. 双向全桥 DC/DC 变换器在直流微电网中的应用[J]. 电测与仪表, 2020, 57(18): 128-132.
SONG Chunning, FU Dong, LI Xin. Application of bi-directional full-bridge DC/DC converter in DC micro-grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(18): 128-132.

[8] 宋强, 赵彪, 刘文华, 等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 9-19.
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. A overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19.

[9] 吕志鹏, 陆立民, 陆怀谷, 等. 一种直流微电网多模式能量管理策略研究[J]. 供用电, 2019, 36(7): 44-51.
LÜ Zhipeng, LU Limin, LU Huaigu, et al. Research on multi-mode energy management strategy of DC microgrid[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(7): 44-51.

[10] LIU J, YANG D, YAO W, et al. PV-based virtual synchronous generator with variable inertia to enhance power system transient stability utilizing the energy storage system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(4): 429-437. DOI: 10.1186/s41601-017-0070-0.

[11] UNAMUNO E, BARRENA J. Design and small-signal stability analysis of a virtual-capacitor control for DC microgrids[C] // 19th European Conference on Power Electronics and Application, August 30-September 1, 2011, Birmingham, UK: 1-10.

[12] 崔健, 吕志鹏, 盛万兴, 等. 一种新型虚拟直流电机控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(10): 3029-3038.
CUI Jian, LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, et al. A new control technology based on virtual DC motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(10): 3029-3038.

[13] SAMANTA S, MISHRA J P, ROY B K, et al. Virtual DC machine: an inertia emulation and control technique for a bidirectional DC–DC converter in a DC microgrid[J]. IET Electric Power Applications, 2018, 12(6): 874-884.

[14] 黄頔, 樊绍胜, 吕志鹏, 等. 负荷用直流变换器的虚拟直流发电机控制策略研究[J]. 电力科学与工程, 2015, 31(4): 32-36, 42.
HUANG Di, FAN Shaosheng, LÜ Zhipeng, et al. Research on control strategy of virtual DC generator for load DC converter[J]. Power Science and Engineering, 2015, 31(4): 32-36, 42.

[15] GUO Y, MENG J, WANG Y, et al. A virtual DC machine control strategy for dual active bridge DC-DC converter[C] // IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia, May 21-24, 2019, Chengdu, China.

[16] 盛万兴, 刘海涛, 曾正, 等. 一种基于虚拟电机控制的能量路由器[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3541-3550.
SHENG Wanxing, LIU Haitao, ZENG Zheng, et al. An energy hub based on virtual-machine control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3541-3550.

[17] 杨赟, 缪惠宇, 梅飞, 等. 对称电压暂降情况下含无功补偿功能的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电测与仪表, 2019, 56(1): 53-59.
YANG Yun, MIAO Huiyu, MEI Fei, et al. Virtual synchronous generator control strategy with reactive power compensation in symmetrical voltage sagging[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(1): 53-59.

[18] ZHI N, DING Y, DU L, et al. Virtual DC generator control strategy based on differential compensation[C] // European Conference on Cognitive Ergonomics, September 29 - October 3, 2019, Baltimore, MD, USA.

[19] SHUCHENG T, GE D, HUI Z, et al. Virtual DC machine control strategy of energy storage converter in DC microgrid[C] // IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), October 12-14, 2016, Ottawa, ON, Canada: 1-5.

[20] 张辉, 谭树成, 肖曦, 等. 具有直流电机特性的储能接口变换器控制策略[J]. 高电压技术, 2018, 44(1): 119-125.
ZHANG Hui, TAN Shucheng, XIAO Xi, et al. Control strategy of energy storage converter with DC machine characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(1): 119-125.

[21] 朱小鹏, 卫志农, 颜全椿, 等. 基于虚拟惯性自适应算法的电动汽车控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 134-141.
ZHU Xiaopeng, WEI Zhinong, YAN Quanchun, et al. Control strategy of electric vehicle based on virtual inertial adaptive algorithms[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 134-141.

[22] LIANG Yalin, HE Yuyao, NIU Yun. Microgrid frequency fluctuation attenuation using improved fuzzy adaptive damping-based VSG considering dynamics and allowable deviation[J]. Energies, 2020, 13(18).

[23] 曹新慧, 刘昱良, 苗世洪, 等. 考虑参数自适应的直流微电网DC/DC变换器虚拟惯性控制策略研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1281-1290.
CAO Xinhui, LIU Yuliang, MIAO Shihong, et al. Research on virtual inertial control strategy of DC/DC converter in DC microgrid considering self-adaptive parameters[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1281-1290.

收稿日期：2020-12-05；　　**修回日期：**2021-02-03

作者简介：

张勤进(1986—)，男，博士，副教授，研究方向为船舶直流综合电力系统、直流微电网；E-mail: zqj20@dlmu.edu.cn

张瀚文(1997—)，男，通信作者，硕士研究生，研究方向为直流微电网稳定控制技术。E-mail: zhanghanwen0132@163.com

（编辑　许　威）