

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220665

基于虚拟直流机的直流微电网电压稳定控制策略

刘自发, 刘炎

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 针对大量恒功率负荷接入直流微电网致使直流微电网失稳的问题, 提出了一种基于虚拟直流机(VDCM)的直流微电网电压稳定控制策略。控制策略以储能双向 DC/DC 变流器为研究对象, 基于直流电机原理, 以电感电流为反馈量在传统下垂控制的基础上引入 VDCM 环节, 增强系统阻尼, 降低恒功率负荷对系统稳定性的影响。通过建立所提控制策略下的直流微电网小信号模型, 利用阻抗匹配原则分析相关参数变化时系统的稳定性, 并将其与传统的 VDCM 控制策略进行对比。最后, 搭建仿真模型和硬件实验平台, 验证所提控制策略的有效性。结果表明: 所提控制策略使变流器具备了直流电机的惯量和阻尼特性, 在提升系统稳定性的同时, 也在一定程度上改善了系统动态响应性能, 且其控制效果优于传统的 VDCM 控制策略。

关键词: 直流微电网; 虚拟直流机; 恒功率负荷; 小信号模型; 稳定性分析

Voltage stability control strategy of a DC microgrid based on a virtual DC machine

LIU Zifa, LIU Yan

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: To solve the problem of DC microgrid instability caused by constant power load, a voltage stability control strategy based on a virtual DC machine (VDCM) is proposed. Taking the bidirectional DC/DC converter of energy storage as the research object, and based on the principle of a DC machine, the control strategy introduces a VDCM link on the basis of traditional droop control with the inductance current as the feedback quantity to increase the system damping and reduce the influence of constant power load on system stability. By establishing the small signal model of the DC microgrid with the proposed control strategy, the stability of the system when relevant parameters change is analyzed with the principle of impedance matching. Then the proposed control strategy is compared with the traditional VDCM control strategy. Finally, the simulation model and hardware experimental platform are built to verify the effectiveness of the proposed control strategy. The results show that the strategy makes the converter have the inertia and damping characteristics of a DC machine. This not only improves the stability of the system, but also improves the dynamic response performance to a certain extent. Its control effect is better than that the traditional VDCM control strategy.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51977074).

Key words: DC microgrid; virtual DC machine; constant power load; small signal model; stability analysis

0 引言

随着化石能源短缺以及“双碳”目标的提出, 国家大力倡导新能源的发展, 大量的分布式光伏、风电接入电网。为了降低对大电网的影响, 分布式电源一般经微电网并入电网, 微电网的相关研究也因此引起广泛关注^[1-5]。随着电动汽车、通信设备等直流负荷比例逐年增加, 交流微电网在运行控制方面面临着越来越多的挑战。直流微电网以其具有换

流环节少、能量利用率高、控制简单、没有无功频率问题等优点成为未来电力发展的一个重要方向^[6-10]。

在直流微电网中, 大部分负荷都通过恒功率控制方式的电力电子变换器接入电网, 其外特性表现为恒功率负荷。由于恒功率负荷具有负阻尼特性, 其大量接入会降低系统阻尼, 引起系统稳定性问题, 因此, 如何提升恒功率负荷大量接入下的直流微电网稳定性成为当前研究的热点^[11-14]。

目前, 对于提升直流微电网稳定性的研究主要是基于无源阻尼法和有源阻尼法。相比于无源阻尼法, 有源阻尼法系统不需要配置额外硬件, 不会产

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51977074)

生额外的损耗与费用, 只需改变换流器控制方式即可为系统提供附加阻尼, 因此成为了当前提升直流微电网稳定性的主要方法。文献[15]提出了一种基于线性反馈的有源阻尼策略, 以源侧升压变换器电感电流为反馈量提升系统阻尼, 但反馈中引入了微分环节, 系统容易受高频分量的影响。文献[16]提出了一种基于状态反馈的直流微电网有源阻尼控制技术, 以系统振荡电压和振荡电流为反馈量设计变流器占空比, 并采用极点配置法优化相关控制参数。文献[17]分析恒功率负载接入风储直流微电网的稳定性, 提出一种以输出电压电流为反馈量的阻尼补偿器, 并对比分析了补偿器分别位于电压外环、电流内环以及占空比输出端时的系统阻尼提升效果。文献[18]提出了一种基于并网接口变流器直流电流前馈的有源阻尼方法, 通过将变流器出口电流经高通滤波环节前馈到电压外环, 在不改变系统稳定工作点的情况下补偿系统阻尼。文献[19]分析了恒功率负荷对直流微电网稳定性的影响, 提出了基于低通滤波器的有源阻尼方法, 通过在下垂环节中串入低通滤波环节, 有效降低系统电源输出阻抗, 提升了系统稳定裕度。从以上文献可以看出, 现有的有源阻尼方法虽然在一定程度上能够提升系统稳定性, 但均忽略了电力电子系统低惯量的特点, 没有考虑直流微电网系统低惯量特点对系统的影响。

虚拟直流机(virtual DC machine, VDCM)技术是近几年兴起的直流微电网控制技术, 它通过设计变流器控制算法, 使得变流器具备直流电机的运行特性, 从而提升系统相关性能。国内外已有学者对此做出相关研究。文献[20-22]基于单台变流器提出 VDCM 控制, 通过模拟直流电机特性增强系统惯性, 提升系统动态响应性能。文献[23-24]研究了 VDCM 技术应用于多台变流器并联的控制, 通过在 VDCM 控制中加入功率分配算法, 使得变流器在具备直流电机惯性的同时, 实现多变流器的协调控制。然而, 已有文献均是研究 VDCM 技术对系统动态响应性能即系统惯量的提升, VDCM 技术对系统稳定性的提升却少有研究。

针对以上问题, 本文提出了一种基于 VDCM 的电压稳定控制策略, 研究 VDCM 技术对系统稳定性的提升, 同时兼顾系统惯量提升。不同于已有的将 VDCM 环节串入 PI 双环中的做法, 本文所提控制策略将 VDCM 环节以电感电流前馈的形式引入到 PI 双闭环中, 从而改善变流器控制性能, 提升电压稳定性。首先, 基于直流电机原理, 给出基于 VDCM 控制的直流微电网电压稳定控制策略控制框图。其次, 对系统进行小信号建模, 基于 Middlebrook 阻

抗比判据分析相关参数变化对系统稳定性的影响, 并将其与传统的 VDCM 控制策略进行对比。最后, 通过仿真和实验验证所提控制策略的正确性。

1 直流微电网结构

本文研究的孤岛直流微电网结构如图 1 所示, 它主要由分布式电源、储能单元、阻性负载和恒功率负载组成。阻性负载直接接于直流母线上, 其功率 P_L 随母线电压变化; 直流负荷和交流负荷分别经恒压控制的换流器接于直流母线, 可视为恒功率负载, 其功率分别为 P_{cp1} 和 P_{cp2} ; 分布式电源包括风机和光伏, 均采用最大功率点追踪控制方式, 以最大限度利用可再生能源, 其输出功率分别为 P_w 和 P_v ; 储能单元采用下垂控制方式, 以保持直流母线电压稳定, 其输出功率为 P_B 。

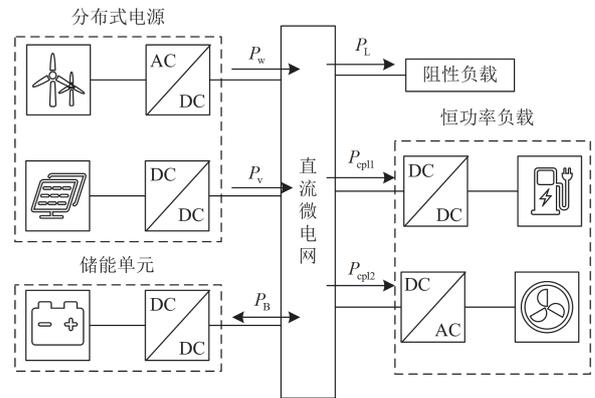


图 1 孤岛直流微电网结构

Fig. 1 Structure of islanding DC microgrid

为了便于后续直流微电网建模和稳定性分析, 需对直流微电网进行等值转化。在短时间尺度内, 分布式电源输出功率可认为不变, 等效为功率为负的恒功率负荷。因此, 可将其与恒功率负载合并, 得到等效恒功率负荷 $P_{cp1} = P_{cp1} + P_{cp2} - P_w - P_v$ 。从而将直流微电网转化为由储能电源、双向 DC/DC 变流器、阻性负荷和恒功率负荷组成的等效模型^[16,25], 如图 2 所示。

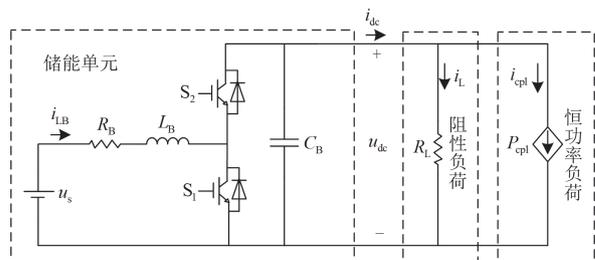


图 2 直流微电网等效模型

Fig. 2 Equivalent model of DC microgrid

图中, u_s 为储能电源等效电压; R_L 为阻性负荷电阻值; L_B 、 R_B 和 C_B 分别为双向 DC/DC 变流器的滤波电感、滤波电感寄生电阻和稳压电容; u_{dc} 、 i_{dc} 、 i_{LB} 分别为直流母线电压、变流器输出电流以及滤波电感电流; i_L 、 i_{cpl} 分别为流过阻性负荷和等效恒功率负荷的电流。为了便于管理, 一般情况下直流微电网的规模不是很大, 其线路阻抗忽略不计。

2 基于 VDCM 的直流微电网电压稳定控制策略

由于恒功率负荷的负阻尼特性, 当直流微电网中恒功率负荷增加时, 系统稳定性会降低。本文在储能双向 DC/DC 变流器双闭环下垂控制的基础上引入 VDCM 环节, 以增加系统惯性和阻尼, 提升系统稳定性。

2.1 VDCM 原理

直流电机数学模型可分为电磁部分和机械部分两部分。其中, 机械部分为转子运动方程。

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D(\omega - \omega_0) \quad (1)$$

$$T_e = \frac{P_e}{\omega} \quad (2)$$

式中: J 为转动惯量; D 为阻尼系数; T_m 和 T_e 分别为直流电机机械转矩和电磁转矩; P_e 为电磁功率; ω 和 ω_0 分别为转子实际角速度和额定角速度。

电磁部分主要是电动势平衡方程, 可表示为

$$E = U + R_a I_a \quad (3)$$

$$P_e = E I_a \quad (4)$$

式中: R_a 、 I_a 分别为电枢等效电阻和电枢电流; E 、 U 分别为电枢感应电动势和机端电压。

机械部分与电磁部分耦合方程, 可表示为

$$E = C_T \Phi \omega \quad (5)$$

式中: C_T 为直流电机转矩系数; Φ 为每极磁通。

图 3 为双向 DC/DC 变流器与直流电机等效电路。其中 U_s 、 I_{LB} 为双向 DC/DC 变流器等效电路输入端电压、电流; L 、 C 为双向 DC/DC 变流器滤波电感和稳压电容; U_i 、 I_i 为直流电机等效电路输入端电压、电流; P_m 为直流电机输入的机械功率; U_o 、 I_o 为各等效电路输出端电压、电流。双向 DC/DC 变流器可以等效为一个二端口网络, 输入端口接储能装置, 输出端口接直流母线。可以将直流电机原理引入到双向 DC/DC 变流器的控制中, 使得变流器端口具备直流电机外特性, 从而增强系统阻尼, 提高系统直流母线电压稳定性。

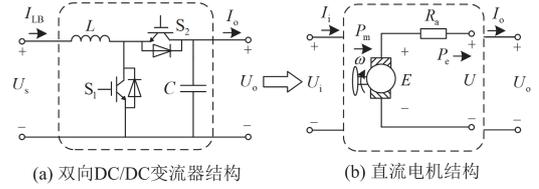


图 3 双向 DC/DC 变流器与直流电机等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of bidirectional DC/DC converter and DC machine

2.2 VDCM 电压稳定控制策略

基于直流电机原理, 将直流电机方程引入到双向 DC/DC 变流器的控制中, 令

$$P_m = u_s i_{LB} \quad (6)$$

$$I_a = i_{dc} \quad (7)$$

结合式(1)一式(6)给出 VDCM 环节的控制框图, 如图 4 所示。

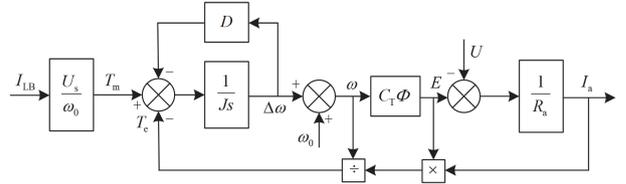


图 4 VDCM 环节控制框图

Fig. 4 Control block diagram of VDCM

根据图 4 所示控制框图, 可得虚拟直流机环节传递函数为

$$G(s) = \frac{U_s C_T \Phi}{J R_a \omega_0 s + D R_a \omega_0 + (C_T \Phi)^2 \omega_0} \quad (8)$$

式(8)表明, 虚拟直流机环节实际上是一个以转动惯量 J 和阻尼系数 D 为参量的一阶惯性环节, 其在物理层面可等效为数值可变的虚拟电容, 通过调节 J 和 D 改变虚拟电容的大小, 改变系统惯性和阻尼, 提升系统稳定性。

基于 VDCM 的电压稳定控制策略如图 5 所示。图中, k_B 为下垂系数, $G_v(s)$ 和 $G_i(s)$ 分别为电压环和电流环 PI 控制器的传递函数。

图 5 中, VDCM 电压稳定控制策略由虚拟直流机环节、双闭环下垂控制环节组成; 变流器电感电流经虚拟直流机环节并乘以下垂系数前馈到电压外环, 与电压参考值和输出端电压比较后经 PI 控制器产生电流内环参考值, 再经电流内环 PI 控制器和 PWM 调制环节产生变流器所需控制信号。不同于传统 VDCM 控制策略中将 VDCM 环节串入 PI 双环中的做法, 本文所提 VDCM 电压稳定控制策略将 VDCM 环节以电感电流前馈的形式引入到 PI 双闭环控制中, 为系统提供一定惯量的同时, 还能大幅提高系统的直流电压稳定性。

3 VDCM 电压稳定控制策略性能分析

基于控制策略的小信号模型, 本节从系统稳定性以及电压动态响应两个方面, 分析 VDCM 电压稳定控制策略对恒功率负荷接入下直流微电网性能的影响。

3.1 系统稳定性分析

采用 Middlebrook 阻抗比判据^[26]来判断恒功率负荷接入下的系统稳定性, 当系统环路增益 T_m 的 Nyquist 曲线不包围 $(-1,0)$ 点时, 系统稳定, 反之, 系统失稳。其中 $T_m = Z_{so} / Z_{Li}$, Z_{so} 为电源输出阻抗, Z_{Li} 为负载输入阻抗。对于负载输入阻抗 Z_{Li} , 本节仅考虑系统负荷全为恒功率负荷的极端情况, 采用 Buck 变换器接阻性负载作为恒功率负荷, 控制方式为单电压环恒压控制。则负载输入阻抗为

$$Z_{Li}(s) = \frac{Z_{inL}(1 + G_{PI}G_{udL})}{1 + G_{PI}G_{udL} - Z_{inL}G_{PI}G_{uuL}G_{idL}} \quad (21)$$

式中: Z_{inL} 为变流器开环输入阻抗; G_{PI} 为 PI 控制器传递函数; G_{udL} 为占空比到输出电压传递函数; G_{uuL} 为输入电压到输出电压传递函数; G_{idL} 为占空比到输入电流传递函数。

系统参数如表 1 所示, 下垂系数取为 0.5, 电压环 PI 参数整定为 $k_{pu} = 2.45$, $k_{iu} = 740$, 电流环 PI 参数整定为 $k_{pi} = 0.054$, $k_{ii} = 197.78$ 。

表 1 直流微电网系统参数

Table 1 Parameters of the DC microgrid

子系统	参数	值
双向 DC/DC 变换器	输入电压 u_b/V	100
	滤波电感 L_b/mH	2 mH/0.04 Ω
	滤波电感寄生电阻 R_b/Ω	2200
	稳压电容 $C_b/\mu F$	2200
	开关频率 f_s/kHz	10
Buck 变换器	输出电压 u_L/V	100
	滤波电感 L_L/mH	3 mH/0.1 Ω
	滤波电感寄生电阻 r_L/Ω	200
	稳压电容 $C_L/\mu F$	200
	开关频率 f_s/kHz	10
直流母线单元	直流母线电压 u_{dc}/V	200
	额定角速度 $\omega_0/(rad \cdot s^{-1})$	100 π
	电枢等效电阻 R_a/Ω	0.2
VDCM 参数	转矩系数 C_T	38.20
	每极磁通 Φ/Wb	0.0167
	下垂系数 k_b	0.5
	转动惯量 J	0.001
	阻尼系数 D	0.01

首先, 分析恒功率负荷接入直流微电网对系统稳定性的影响。图 7 为系统下垂控制方式下恒功率负荷取不同值时 T_m 对应的 Nyquist 曲线; 随着恒功率负荷增加, T_m 对应的 Nyquist 曲线逐渐靠近 $(-1,0)$ 点, 当恒功率负荷增加至 4.2 kW 时, Nyquist 曲线包围 $(-1,0)$ 点, 系统失稳。可以看出, 系统所带恒功率负荷增大会减小系统稳定裕度, 降低系统稳定性。当大量恒功率负荷接入系统时, 下垂控制显然不能满足系统稳定性要求, 可考虑采用其他提升系统稳定性的控制策略。

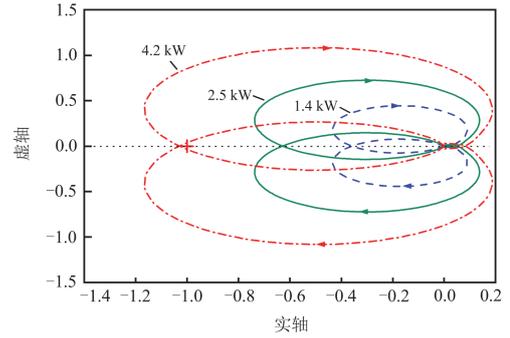


图 7 恒功率负荷取不同值时 T_m 的 Nyquist 曲线

Fig. 7 Nyquist plots of T_m with different constant power loads

图 8 为恒功率负荷为 4 kW 时, 系统分别采用下垂控制、传统 VDCM 控制策略以及本文 VDCM 电压稳定控制策略时 T_m 对应的 Nyquist 曲线。传统 VDCM 控制策略下电源输出阻抗参考文献[20]。可以看出, 下垂控制方式下 T_m 对应的 Nyquist 曲线几乎包围 $(-1,0)$ 点, 系统几近失稳; 当采用传统 VDCM 控制策略以及本文 VDCM 电压稳定控制策略时, T_m 对应的 Nyquist 曲线远离 $(-1,0)$ 点, 系统稳定性提高, 且本文所提控制策略稳定裕度更高。因此, 相比于常规的下垂控制方式, 采用 VDCM 控制策略可以大幅提升系统稳定性, 且本文所提 VDCM 电压稳定控制策略稳定性优于传统 VDCM 控制策略。

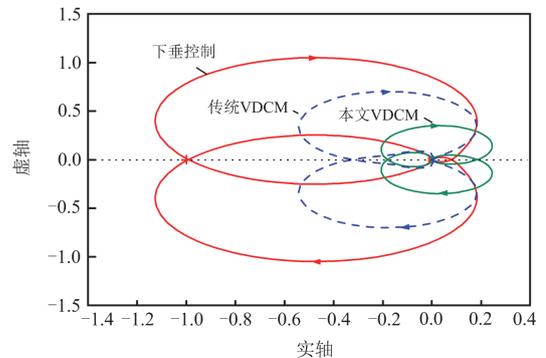
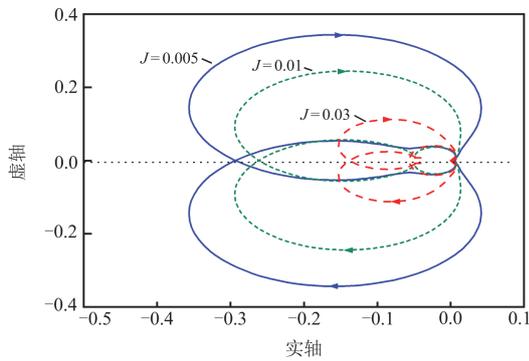


图 8 不同控制策略下 T_m 的 Nyquist 曲线

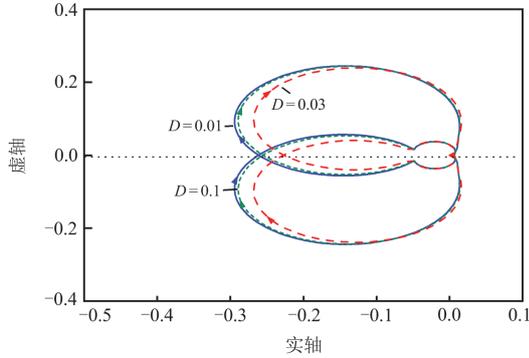
Fig. 8 Nyquist plots of T_m with different control strategies

接下来分析本文 VDCM 电压稳定控制策略相关参数变化时对系统稳定性的影响。

图 9 为恒功率负荷为 4.2 kW 时, VDCM 电压稳定控制策略相关参数变化时系统 T_m 对应的 Nyquist 曲线。其中, 图 9(a)为阻尼系数 D 取 0.01 时转动惯量 J 不同取值下系统 T_m 对应的 Nyquist 曲线。可以看出, 随着 J 取值增大, T_m 对应的 Nyquist 曲线逐渐远离 $(-1,0)$ 点, 系统稳定裕度增加。考虑到 J 取值过大会影响系统的动态响应, 可在保证系统稳定裕度的前提下, 根据系统动态响应指标选取合适的 J 值。



(a) 转动惯量 J 取不同值时 T_m 的 Nyquist 曲线



(b) 阻尼系数 D 取不同值时 T_m 的 Nyquist 曲线

图 9 VDCM 电压稳定控制策略相关参数变化时 T_m 的 Nyquist 曲线

Fig. 9 Nyquist plots of T_m when relevant parameters of VDCM voltage stability control strategy change

图 9(b)为转动惯量 J 取值 0.001 时阻尼系数 D 不同取值下系统 T_m 对应的 Nyquist 曲线。可以看出, 随着 D 取值增大, T_m 对应的 Nyquist 曲线逐渐远离 $(-1,0)$ 点, 系统稳定裕度增加。但相比于 J , D 提升系统稳定裕度的作用有限, 同时由式(1)可知, 过大的 D 值会增大系统稳态误差, 在设计时 D 选取适当参数即可。

图 10 为不同控制方式下系统电源输出阻抗 $Z_{so}(s)$ 的伯德图。可以看到, 相比于下垂控制, 传统 VDCM 控制策略削减了系统电源高频段输出阻抗, 降低了系统谐振峰值, 系统稳定性提高。然而本文所提 VDCM 电压稳定控制策略不仅能够削减系统电源高频段的输出阻抗, 同时也能减小低频段的输出阻抗, 降低了系统电源在全频段的输出阻抗, 减小了电源输出阻抗与负载输入阻抗交越的概率, 提升了系统稳定裕度, 控制效果明显优于传统 VDCM 控制策略。这是由于本文所提策略是以电感电流为下垂环节的反馈量, 减少了以输出电流 i_{dc} 为反馈的回路, 同时 J 和 D 增加了系统阻尼, 降低了系统谐振峰值, 因此, 可以大幅提升系统稳定性。

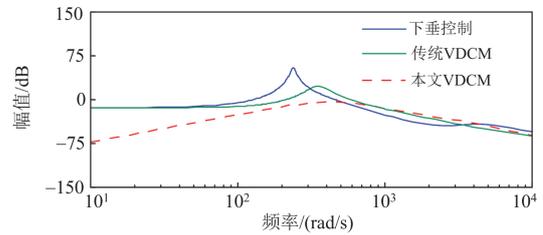


图 10 传递函数 Z_{so} 的伯德图

Fig. 10 Bode plots of the transfer function Z_{so}

3.2 动态响应性能分析

本文所提控制策略在提升系统稳定性的同时也能在一定程度上改善系统动态响应性能。由于本文研究的是恒功率负荷接入下直流微电网电压失稳的抑制问题, 控制策略的动态响应不是本文重点, 本处只对控制策略的动态响应作简要分析。

图 11 为系统阶跃响应曲线。从图 11 中可以看出, 引入 VDCM 环节后, 系统电压超调减小, 电压变化变平缓, 系统惯量增大, 且本文所提 VDCM 电压稳定控制策略动态性能更好。

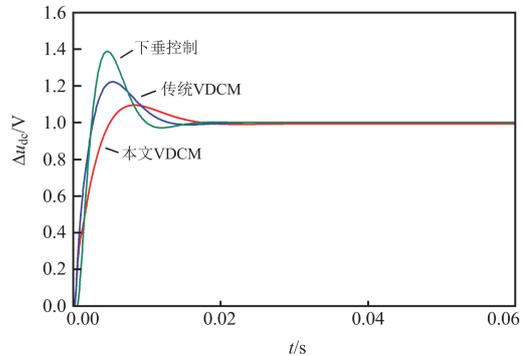


图 11 系统阶跃响应

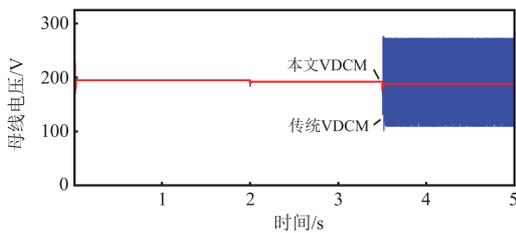
Fig. 11 Step response of system

4 仿真分析与实验验证

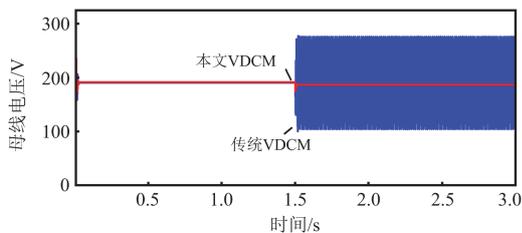
4.1 仿真分析

为验证上述理论分析的结论，基于 PSCAD/EMTDC 软件搭建如图 12 所示的直流微电网仿真模型，其中恒功率负荷采用 Buck 变换器接阻性负载代替。仿真模型系统参数如表 1 所示。

图 12 为系统分别采用下垂控制策略、传统 VDCM 控制策略以及本文所提 VDCM 电压稳定控制策略下的直流母线电压波形。图 12(a)中，系统负荷全为恒功率负荷，初始负荷为 2 kW，2 s 时负荷突增至 3 kW，3.5 s 时负荷突增至 4.2 kW。可以看出，当系统采用下垂控制策略时，恒功率负荷增至 4.2 kW，电压发生振荡，系统失稳，与第 3 节理论分析一致；当系统采用 VDCM 电压稳定控制策略时，负荷增至 4.2 kW 的情况下直流母线电压也没有发生振荡，说明 VDCM 电压稳定控制策略可以有效抑制直流母线电压振荡，提升系统稳定性，验证了本文所提策略的有效性。



(a) 下垂控制与本文VDCM控制策略电压波形对比



(b) 传统VDCM控制策略与本文VDCM控制策略电压波形对比

图 12 不同控制策略下的直流母线电压波形

Fig. 12 DC bus voltage waveform under different control strategies

图 12(b)为系统在传统 VDCM 控制策略下以及本文所提控制策略下的直流母线电压波形。系统初始负荷设置为 3.3 kW，1.5 s 时负荷突增至 5 kW。可以看到，当负荷增至 5 kW 时，传统 VDCM 控制策略下的直流母线电压波形已不能维持稳定，电压发生振荡，而在本文所提控制策略下的直流母线电压波形仍能保持稳定运行。这说明本文所提控制策略稳定裕度更高，带恒功率负荷能力更强。

图 13 为负荷突增时直流母线电压的动态响应波形。从图 13 中可以看出，发生负荷扰动时，相比于下垂控制，传统 VDCM 控制策略以及本文所提 VDCM 电压稳定控制策略均能减小直流母线电压的跌落程度，有效改善系统动态响应性能，且本文所提控制策略性能提升效果优于传统的 VDCM 控制策略。

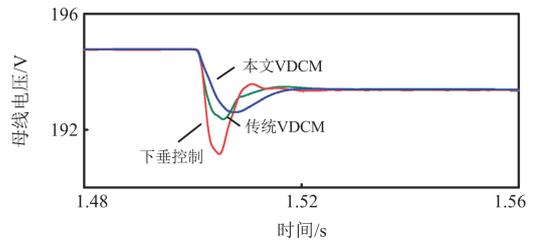
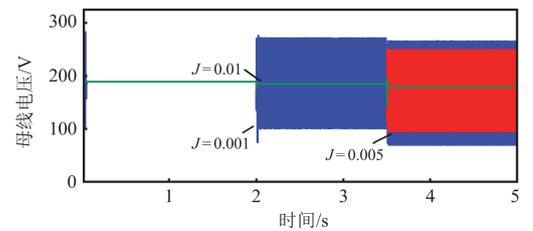
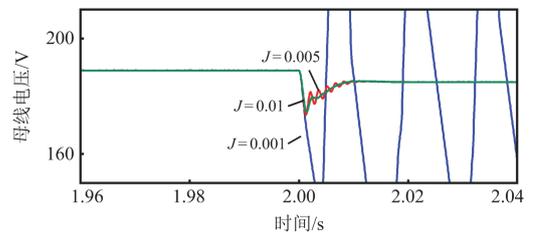


图 13 不同控制策略下的直流母线电压动态响应波形
Fig. 13 Dynamic response waveform of DC bus voltage under different control strategies

图 14 为系统采用 VDCM 电压稳定控制策略时不同控制参数下的直流母线电压波形。系统负荷全为恒功率负荷，初始负荷为 4.2 kW，2 s 时负荷突增至 5.6 kW，3.5 s 时负荷突增至 7.2 kW。图 14(b)为图 14(a)中 2 s 时直流母线电压的放大波形，当负荷扰动发生后，随着转动惯量 J 的增大，直流母线电压暂态过程中的振荡减少，系统阻尼增大。结合图 14(a)和图 14(b)可以看出，随着恒功率负荷增加，系统稳定性降低，直流母线电压发生振荡；随着转



(a) 负荷变化情况下直流母线电压波形



(b) 2 s时直流母线电压局部放大波形

图 14 VDCM 电压稳定控制策略不同控制参数下的直流母线电压波形

Fig. 14 DC bus voltage waveform under different parameters of VDCM voltage stability control strategies

动惯量 J 的增大, VDCM 电压稳定控制策略稳压效果增强, 电压振荡被有效抑制, 系统所能带的恒功率负荷增加, 系统带恒功率负荷的能力显著提升。

从以上仿真结果可以看出, 恒功率负荷接入直流微电网会导致系统稳定性下降, 使直流母线电压发生振荡; 相比于下垂控制, 引入 VDCM 环节后的控制策略可以有效抑制系统电压振荡, 提高系统带恒功率负荷能力; 相比于传统 VDCM 控制策略, 本文所提 VDCM 电压稳定控制策略控制性能更优。

4.2 实验验证

为进一步验证所提控制策略的有效性, 搭建了结构如图 2 所示的直流微电网, 其对应的硬件实验平台如图 15 所示。系统各参数与仿真参数一致。

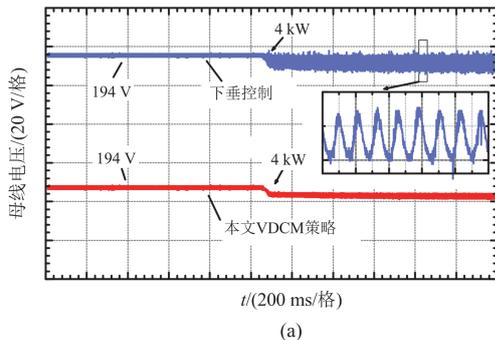


图 15 硬件实验平台

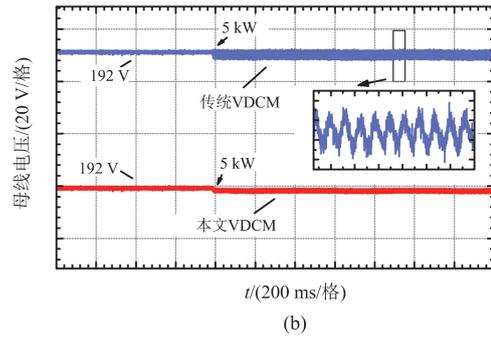
Fig. 15 Hardware experimental platform

图 16 为不同控制策略下直流母线电压实验波形。图 16(a)为恒功率负载由 2.7 kW 增至 4 kW 时, 系统分别采用下垂控制策略以及 VDCM 电压稳定控制策略时的电压波形。当恒功率负载增至 4 kW 时, 下垂控制下的直流母线电压出现振荡, 系统失稳, 而 VDCM 电压稳定控制策略下的直流母线电压仍能稳定运行。可见, 本文所提 VDCM 电压稳定控制策略能有效提高系统稳定性。

图 16(b)为恒功率负荷由 3.3 kW 增至 5 kW 时, 系统分别采用传统 VDCM 控制策略以及本文所提 VDCM 控制策略时的电压波形。当负荷增至 5 kW 时, 传统 VDCM 策略下的母线电压已经失稳, 而采



(a)



(b)

图 16 负荷增加时直流母线电压实验波形

Fig. 16 Experimental waveform of DC bus voltage under load increase

用本文所提控制策略的母线电压仍能稳定运行。可见本文所提出的控制策略稳定性更好, 系统稳定裕度更高。

图 17 为恒功率负载由 2.7 kW 增至 3.5 kW 时, 不同控制策略下直流母线电压动态响应实验波形。可以看到, 下垂控制下的直流母线电压动态过程存在明显的电压过冲, 系统惯量低; 而 VDCM 控制下的直流母线电压动态过程无明显电压过冲现象, 系统惯量提升。且相比于传统 VDCM 策略, 本文所提控制策略下的母线电压动态响应更加平滑。

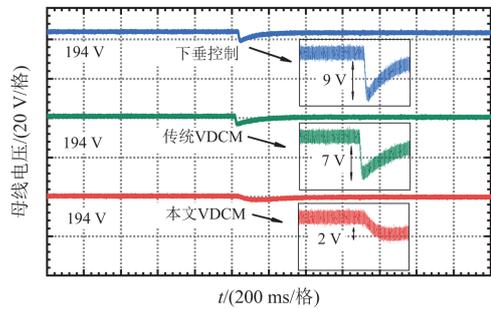


图 17 负荷增加时母线电压动态响应波形

Fig. 17 Dynamic response waveform of bus voltage under load increase

实验结果表明, 本文所提基于 VDCM 的电压稳定控制策略可以有效抑制恒功率负载导致的直流母线电压振荡, 提升系统稳定性, 同时也能在一定程度上增加系统惯量, 改善系统动态性能, 且控制性能优于传统 VDCM 控制策略。

5 结论

为解决恒功率负荷接入下的直流微电网失稳问题, 本文提出一种基于 VDCM 控制的直流微电网电压稳定控制策略, 通过理论分析与实验验证, 得到以下结论:

1) 基于 VDCM 的电压稳定控制策略通过在下垂控制中引入 VDCM 环节可有效增加系统阻尼,提升系统稳定性。

2) 利用 Middlebrook 阻抗比判据分析本文所提控制策略相关参数变化时的系统稳定性,结果表明:阻尼系数 D 对系统稳定性影响不大;转动惯量 J 增大可以有效提高系统稳定性,提升系统带恒功率负荷能力。

3) 基于 VDCM 的电压稳定控制策略在提升系统稳定性的同时,也能一定程度提升系统惯量,改善系统动态响应性能,且控制性能优于传统 VDCM 控制。

4) 本文仅考虑了单台变流器采用 VDCM 电压稳定控制策略的情况,未考虑多台变流器并联运行时的协调控制,这也是下一步的研究方向。

参考文献

- [1] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
YANG Xinfa, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [2] 米阳, 王鹏, 邓锦, 等. 孤岛交直流混合微电网群分层协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 1-8.
MI Yang, WANG Peng, DENG Jin, et al. Hierarchical coordinated control of island AC/DC hybrid microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 1-8.
- [3] 武文平, 崔扬, 颜湘武. 分布式微电网自同步电压源并列运行策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(12): 107-117.
WU Wenping, CUI Yang, YAN Xiangwu. Operation strategy of parallel self-synchronizing voltage sources in a distributed microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(12): 107-117.
- [4] 李占凯, 李炬, 张福民, 等. 基于交流信号注入的混合微电网功率均衡策略[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(2): 18-26, 34.
LI Zhankai, LI Ju, ZHANG Fumin, et al. Power balance control strategy of hybrid microgrid based on AC signal injection[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(2): 18-26, 34.
- [5] 张志友, 陈德富. 基于级联分布式架构的直流微电网协调控制方法[J]. 电测与仪表, 2021, 58(7): 157-164.
ZHANG Zhiyou, CHEN Defu. A coordinated control method for DC microgrids based on cascaded distributed framework[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(7): 157-164.
- [6] 李霞林, 郭力, 王成山, 等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 2-17.
LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Key technologies of DC microgrids: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.
- [7] 文劲宇, 周博, 魏利岫. 中国未来电力系统储电网初探[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 1-10.
WEN Jinyu, ZHOU Bo, WEI Lishen. Preliminary study on an energy storage grid for future power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 1-10.
- [8] 李霞林, 王成山, 郭力, 等. 直流微电网稳定控制关键技术研究综述[J]. 供用电, 2015, 32(10): 1-14.
LI Xialin, WANG Chengshan, GUO Li, et al. A review on the key stability control technologies of DC microgrid[J]. Distribution & Utilization, 2015, 32(10): 1-14.
- [9] 王建军, 孙媛媛, 马钊, 等. 孤岛直流微电网接地运行方式及接地故障特性研究[J]. 供用电, 2021, 38(1): 3-10, 24.
WANG Jianjian, SUN Yuanyuan, MA Zhao, et al. Study on grounding method and grounding fault characteristics of islanded DC microgrid[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(1): 3-10, 24.
- [10] 季宇, 苏剑, 丁保迪, 等. 直流微电网储能系统的无源-滑模复合控制方法研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(9): 63-70.
JI Yu, SU Jian, DING Baodi, et al. Research on passive based control combined SMC control of DC micro-grid energy storage system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(9): 63-70.
- [11] 黄旭程, 刘亚丽, 陈燕东, 等. 直流电网阻抗建模与振荡机理及稳定控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(7): 108-117.
HUANG Xucheng, LIU Yali, CHEN Yandong, et al. Impedance-based modeling, stability analysis and virtual damping approach in DC grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7): 108-117.
- [12] ANSARI S, ZHANG J, SINGH R E. A review of stabilization methods for DCMG with CPL, the role of bandwidth limits and droop control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(1): 14-25.
- [13] 任勇, 曾鸣. 独立光储直流微网的稳定运行控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 75-86.
REN Yong, ZENG Ming. Stable operation control strategy for an independent DC microgrid with photovoltaics and a storage system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 75-86.
- [14] 王成山, 李微, 王议锋, 等. 直流微电网母线电压波动

- 分类及抑制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 84-98.
- WANG Chengshan, LI Wei, WANG Yifeng, et al. DC bus voltage fluctuation classification and restraint methods review for DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 84-98.
- [15] JAMI M, SHAFIEE Q, EGUCHI K, et al. Stability and inertia response improvement of boost converters interlaced with constant power loads[J]. International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 2020, 16(2): 765-782.
- [16] 付媛, 李浩, 张祥宇. 基于振荡状态反馈的直流微网储能换流器的有源阻尼控制技术[J]. 高电压技术, 2021, 47(3): 927-937.
- FU Yuan, LI Hao, ZHANG Xiangyu. Active damping control of energy storage converter in DC microgrid based on oscillatory state feedback[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 927-937.
- [17] GHADIRIYAN S, RAHIMI M. Mathematical representation, stability analysis and performance improvement of DC microgrid system comprising hybrid wind/battery sources and CPLs[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2019, 13(10): 1845-1855.
- [18] 季宇, 王东旭, 吴红斌, 等. 提高直流微电网稳定性的有源阻尼方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(2): 370-379.
- JI Yu, WANG Dongxu, WU Hongbin, et al. The active damping method for improving the stability of DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(2): 370-379.
- [19] 郭力, 冯恽彬, 李霞林, 等. 直流微电网稳定性分析及阻尼控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 927-936.
- GUO Li, FENG Yibin, LI Xialin, et al. Stability analysis and research of active damping method for DC microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 927-936.
- [20] SOUMYA S, PRAKASH M J, KRISHNA R B. 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.
- [21] 张勤进, 张瀚文, 刘彦呈, 等. 基于参数自适应的直流微源虚拟发电机控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 90-97.
- ZHANG Qinjin, ZHANG Hanwen, LIU Yancheng, et al. Control strategy for a DC micro source virtual generator based on adaptive parameters[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 90-97.
- [22] 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.
- [23] ZHI N, DING K, DU L, et al. An SOC-based virtual DC machine control for distributed storage systems in DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(3): 1411-1420.
- [24] 张辉, 张凯涛, 肖曦, 等. 模拟直流发电机特性的储能变换器控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(20): 126-132.
- ZHANG Hui, ZHANG Kaitao, XIAO Xi, et al. Control strategy of energy storage converter for simulating DC generator characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(20): 126-132.
- [25] TAHIM A, PAGANO D J, LENZ E, et al. Modeling and stability analysis of islanded DC microgrids under droop control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(8): 4597-4607.
- [26] 张辉, 朱刘柱, 潘鹏鹏, 等. 直流配电系统阻抗判据与导纳判据的比较分析[J]. 电网技术, 2021, 45(3): 1167-1174.
- ZHANG Hui, ZHU Liuzhu, PAN Pengpeng, et al. Comparison between impedance-based criterion and admittance-based criterion for the DC distribution power system[J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 1167-1174.

收稿日期: 2022-05-06; 修回日期: 2022-07-09

作者简介:

刘自发(1973—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为分布式电源接入电网分析、微电网运行控制; E-mail: tjubluesky@163.com

刘炎(1997—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为直流微电网控制。E-mail: liuyan7s53@163.com

(编辑 许威)