

# 虚拟直流电机的虚拟储能控制策略

唐 鹏, 李红伟, 刘 彤, 甘昌坤, 张力丹  
(西南石油大学电气信息学院, 成都 610500)

**摘要:** 虚拟直流电机控制在平抑直流微电网的功率波动、提升直流母线电压稳定性等方面已经得到广泛的应用。由于微电网中分布式电源的随机性和不确定性以及微网中负荷的投切都会使得直流侧母线电压出现较大的波动, 为了提高母线电压的调节能力, 利用可控负荷的调节能力, 结合负载变换器的虚拟电机控制, 提出了1种虚拟直流电机与可控负荷协调的虚拟储能控制策略。通过调节虚拟电机的角速度实现对可控负荷消耗功率的调节, 进而补偿母线功率波动, 提高母线电压的稳定性。建立了虚拟直流电机旋转动能与直流电容充放电能量关系, 通过MATLAB/Simulink搭建仿真模型, 验证了该控制策略的有效性。

**关键词:** 直流微电网; 虚拟直流电机; 直流变换器; 虚拟储能; 仿真分析

## Virtual Energy Storage Control Strategy for Virtual DC Motor

TANG Peng, LI Hongwei, LIU Tong, GAN Changkun, ZHANG Lidan

(School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** Virtual DC motor (VDCM) control has been widely applied in suppressing the power fluctuations of DC microgrid and improving the voltage stability of DC bus. Due to the randomness and uncertainty of distributed generations in microgrid, as well as the load switching in microgrid, the DC bus voltage will fluctuate greatly. To improve the regulation capability of bus voltage, a virtual energy storage control strategy based on the coordination of VDCM control and controllable load is proposed by using the regulation capability of controllable load and the virtual motor control of load converter. By adjusting the angular speed of the virtual motor, the power consumption of the controllable load can be adjusted to compensate the fluctuation of bus power and improve the stability of bus voltage. In addition, the relationship between the rotational kinetic energy of VDCM and the charging and discharging energy of the DC capacitor is established. Finally, a simulation model is built on the MATLAB/Simulink platform to verify the effectiveness of the proposed control strategy.

**Keywords:** DC microgrid; virtual DC motor (VDCM); DC converter; virtual energy storage; simulation analysis

随着清洁能源的大规模应用, 对于分布式能源的整合问题日益突出。近年来直流微电网以其高效、结构简单的特点以及相较于交流电网不存在频率、无功功率和谐波的优点而被广泛的关注<sup>[1-5]</sup>。直流微电网中, 各分布式电源、储能装置以及各类负载需要通过电力电子变换器接入公共直流母线, 母线电压的稳定和直流母线上有功功率的平衡是直

流微电网稳定运行的重要指标。但是, 直流微电网中分布式电源, 如光伏电源、风力发电机等的输出功率具有很明显的波动性, 并且一些交直流负荷的频繁投切也会造成很大的功率波动。这些功率波动尤其是瞬时的功率冲击会使直流母线电压产生很大的波动, 影响直流微电网的稳定性, 严重时可能导致系统崩溃。所以, 维持母线电压的稳定成了直流微电网控制中的重要环节<sup>[6-8]</sup>。

针对直流母线电压稳定控制的问题, 国内外学者提出了许多行之有效的控制策略, 如下垂控制、双闭环PI控制、分级运行控制等<sup>[9-12]</sup>。由于直流微电

收稿日期: 2021-07-21; 修回日期: 2021-09-01, 2021-09-25;

录用日期: 2021-10-11; 网络首发日期: 2022-02-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51607151)

This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 51607151

网缺乏如交流电网的惯性和阻尼,使得直流母线电压对功率的扰动非常敏感,虽然这些传统的控制方法通过对分布式电源或者储能装置的接口变换器进行控制,可以保持母线电压的稳定,但是这些传统的控制策略对直流母线电压稳定性和电能质量的提高有限。为了提高直流微电网的惯性,文献[13]通过类比交流微电网的虚拟同步发电机 VSG(virtual synchronous generator)控制,提出了直流微电网储能接口变换器的类 VSG 控制;文献[14]提出了 1 种具有虚拟直流电机 VDCM(virtual DC motor)特性的储能接口变换器控制策略,该控制策略在储能接口变换器的双闭环恒压控制中加入 VDCM 环节,提高了直流母线电压的动态稳定性;文献[15]提出了 1 种改进的 VDCM 控制,在传统 VDCM 控制中加入微分补偿,提高直流微电网的恢复能力。当母线电压出现小扰动时,上述虚拟电机控制需要储能装置进行频繁的充放电,这会极大地影响储能装置的使用寿命。针对储能装置频繁充放电影响使用寿命的问题,文献[16]利用电机负荷的能量调节特性,建立了电机旋转动能与直流电容的充放电关系,提出利用电机的虚储能调节母线电压波动,改善了储能设备的频繁充放电问题;文献[17]利用可控负荷的虚拟储能在分区运行的特定区域替代混合储能承担电网功率调节,显著改善了直流微电网的稳定性。

在文献[13-17]的基础上,本文针对直流母线电压稳定控制和储能装置频繁充放电的问题,在负载变换器虚拟电机控制的基础上引入虚拟储能控制,将可控负荷与负载变换器虚拟电机控制相结合,通过调节虚拟电机虚拟角速度的大小,调节可控负荷吸收功率的大小,进而实现虚拟储能的充放电效果,从而使直流微电网需求侧得到额外的储能备用,可以分担直流微电网的电压调节压力,提高直流微电网稳定性。

### 1 负载变换器虚拟直流电机控制

本文所研究的直流微电网基本结构如图 1 所

示。图1 中的直流微电网主要由光伏发电单元、超级电容、直流负载以及相应接口变换器组成;光伏接口变换器为 Boost 升压变换器,采用最大功率点跟踪控制 MPPT(maximum power point tracking)以达到光伏最大功率输出;超级电容和蓄电池采用双闭环恒压控制,维持母线电压平衡;普通负荷采用电压 PI 控制,可控负荷采用上述虚拟储能控制实现母线电压调节作用。

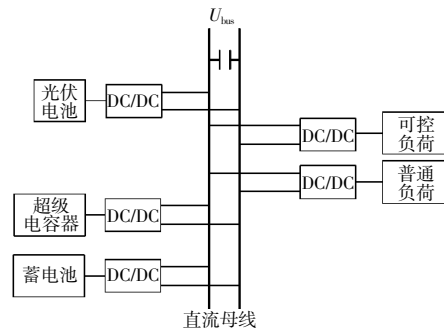
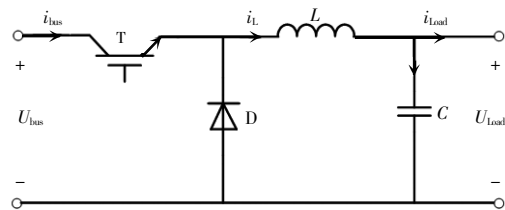


图 1 直流微电网基本结构

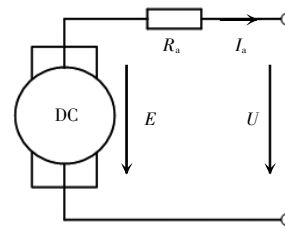
Fig. 1 Basic structure of DC microgrid

#### 1.1 虚拟直流电机等效模型

直流微电网中直流负荷大多通过负载 Buck 变换器与直流母线连接。当负载 Buck 变换器采用 VDCM 控制时,变换器拓补结构以及等效直流电机模型如图 2 所示<sup>[18]</sup>。



(a)变换器拓补结构



(b)等效直流电机模型

图 2 变换器拓补结构以及等效直流电动机模型

Fig. 2 Converter topology and equivalent DC motor model

图 2 中:  $U_{\text{load}}$  为负载电压;  $i_{\text{load}}$  为负载 Buck 变换器输出电流, 即负载电流;  $U_{\text{bus}}$  为负载 Buck 变换器输入电压, 即直流母线电压;  $L$ 、 $C$  分别为电感和电容;  $E$  为电枢感应电动势;  $R_a$  为电枢回路的等效电阻;  $I_a$  为电枢电流;  $U$  为直流电机输入电压。负载变换器采用负载 Buck 降压变换器, 可等效为 1 个二端口网络, 前端为直流母线  $U_{\text{bus}}$ , 后端接入纯阻性负载。该等效的二端口网络与直流电机的等效模型具有一定的确定关系, 可模拟直流电机所具有的特性。

VDCM 模拟的直流电机平衡方程描述如下<sup>[9]</sup>。其中, 直流电机机械方程为

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

$$T_e = P_e / \omega \quad (2)$$

式中:  $T_m$ 、 $T_e$  为直流电机机械转矩和电磁转矩;  $D$  为阻尼系数;  $\omega$  和  $\omega_0$  分别为直流电机的角速度和额定角速度;  $J$  为转动惯量。

电机电枢回路方程为

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

$$E = C_T \Phi \omega \quad (4)$$

式中:  $C_T$  为转矩系数;  $\Phi$  为每极磁通。

当 Buck 变换器采用 VDCM 控制时, 可以使变换器等效为直流电机, 使变换器具备与直流电机相一致的外特性, 通过 VDCM 控制可以增强直流微电网的惯性和阻尼, 提高直流微电网母线电压的稳定性。

## 1.2 Buck 变换器 VDCM 控制策略

Buck 变换器控制框图如图 3 所示, 电压调节环节由变换器输出电压参考值与变换器输出电压比较, 经过 PI 调节器实现对变换器输出电压的调控。由 PI 调节器输出与变换器参考电压计算得出 VDCM 机械功率  $P_m$ , 进一步通过式(2)得到虚拟机械转矩  $T_m$ , 根据机械方程和电枢回路方程式(1)、式(3)可以得到 Buck 变换器 VDCM 控制环节。VDCM 环节使变换器具备与直流电机相同的外特性, 能够获得额外的阻尼和惯性。由 VDCM 环节的电枢回路方程输出变换器电流参考值, 经过 PI 调节和 PWM 得到变换器控制信号<sup>[20]</sup>。

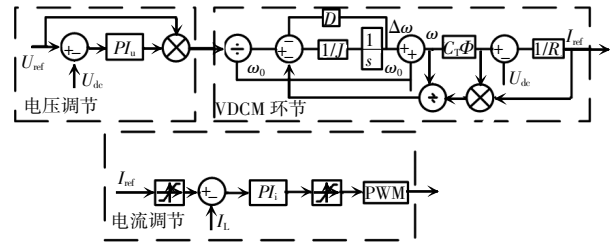


图 3 Buck 变换器 VDCM 控制框图

Fig. 3 VDCM control block diagram of Buck converter

## 2 虚拟储能控制策略

在功率调节过程中, 直流微电网中可利用储能元件平抑功率波动, 但超级电容器的调节能力受限和蓄电池寿命损耗较大是影响系统经济稳定运行的重要因素。Buck 变换器采用 VDCM 控制后, 可以获得与直流电机等效的外特性, 可以将 VDCM 环节中的虚拟转子动能作为虚拟储能控制的可控负荷, 通过调节虚拟转子转速实现对 VDCM 转子动能的调节, 达到与直流电机虚拟储能相同的效果。若直流微电网中的可控负荷与虚拟直流电机控制相结合, 通过虚拟转子动能的改变, 可以实现与普通电机类似的虚拟储能效果, 表现出与储能装置相似的能量调用能力。这样不仅可以分担混合储能元件充放电功率, 最大化利用储能优势, 缓解储能设备的调节压力, 还能够延长储能设备的使用寿命, 为系统运行提供更加可靠的安全保障。

### 2.1 VDCM 虚拟储能模型

Buck 变换器 VDCM 环节与直流电机外特性相同, 忽略阻尼作用, VDCM 转子机械部分储存的旋转动能<sup>[19]</sup>  $E_k$  为

$$E_k = \frac{1}{2} \frac{J\omega^2}{p_n} \quad (5)$$

式中,  $J$ 、 $p_n$  分别为直流电机的转动惯量和极对数。

当虚拟电机转子转速发生变化时, 电磁功率变化量  $\Delta P_M$  为

$$\Delta P_M = \frac{dE_k}{dt} = \frac{J\omega}{p_n^2} \frac{d\omega}{dt} \quad (6)$$

类比文献[17], 将直流电机调速与超级电容充放电相结合, 建立动态能量关系。

当系统发生扰动时, 超级电容充放电功率为

$$P_c = U_c C \frac{dU_c}{dt} \quad (7)$$

式中,  $U_c$  为超级电容  $C$  的电压。

以虚拟直流电机作为可控负荷,利用转子动能作为虚拟储能,分担储能装置承担的系统不平衡功率,可以建立虚拟直流电机转子动能与超级电容储能  $E_{C_{vir}}$  之间的关系为

$$E_k = \int \frac{J_s \omega}{p_n^2} \frac{d\omega}{dt} dt = \int U_c \frac{J_s \omega d\omega/dt}{p_n^2 U_c dU_c/dt} \frac{dU_c}{dt} dt = \int U_c C_{vir} \frac{dU_c}{dt} dt = E_{C_{vir}} \quad (8)$$

式中,  $C_{vir}$  为虚拟储能的电容,可表示为

$$C_{vir} = \frac{J_s \omega d\omega/dt}{p_n^2 U_c dU_c/dt} \quad (9)$$

根据传统储能元件的荷电状态定义,可以将虚拟储能的荷电状态定义为

$$SOC_{vir} = \frac{E_{C_{vir}}}{E_{CN_{vir}}} \quad (10)$$

式中:  $E_{CN_{vir}}$  为虚拟储能超级电容的额定能量,其值等于额定转速下电机的动能,即

$$E_{CN_{vir}} = E_{kN} = \frac{1}{2} \frac{J_s \omega_0^2}{p_n^2} \quad (11)$$

由式(9)~式(11)可得

$$SOC_{vir} = \frac{J_s \omega^2 / 2 p_n^2}{J_s \omega_0^2 / 2 p_n^2} = \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \quad (12)$$

由式(12)可知,以虚拟直流电机作为虚拟储能,其荷电状态与电机角速度直接相关,在直流微电网运行过程中,通过调节虚拟电机转子转速,进而达到调节可控负荷消耗功率的目的,使其能够得到与储能设备一致的调节能力,实现对直流微电网的稳定控制。

虚拟直流电机控制与增加直流母线电容来稳定母线电压的方法一致,在虚拟直流电机控制中引入虚拟储能控制,实际为通过调节虚拟电容的充放电来调节虚拟储能。

由式(9)可得

$$C_{vir} = \frac{J_s \omega d\omega/dt}{p_n^2 U_c dU_c/dt} \approx \frac{J_s}{p_n^2} \frac{\Delta \omega^2}{\Delta U_c^2} = \frac{J_s}{p_n^2} \frac{\omega^2 - \omega^*^2}{\Delta U_c^2} \quad (13)$$

式中,  $\omega^*$  为虚拟直流电机角速度的参考值,在其调节范围内,由式(13)可得

$$\omega^* = \sqrt{C_{vir} \frac{p_n^2}{J_s} \Delta U_c^2 + \omega^2} \quad (14)$$

将式(14)加入到虚拟直流电机控制中可以得到如图 4 所示的虚拟储能控制策略。在该控制策略下通过检测超级电容端电压变化量  $\Delta U_c$ ,由式(14)可知,超级电容端电压增大时,虚拟直流电机的参考角速度  $\omega^*$  增大,虚拟储能充电,虚拟直流电机的电枢电压增大,在 VDCM 控制下变换器参考电流增大,可控负荷消耗功率增加,分担超级电容充电功率,减少蓄电池动作时间。

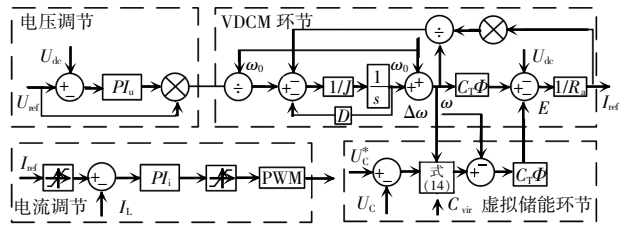


图 4 Buck 变换器 VDCM 虚拟储能控制框图

Fig. 4 Block diagram of VDCM virtual energy storage control of Buck converter

## 2.2 含虚拟储能的混合储能协调控制

直流微电网中直流负荷一般经由 DC/DC 接入直流母线,通过对 DC/DC 变换器施加虚拟储能控制,可以对接入直流微电网的可控负荷吸收功率进行调节,从而使可控负荷达到与传统储能设备类似的虚拟储能效果。常见的可控负荷包括储热负荷、照明负荷等热负荷以及电解水制氢、电制天然气等储气负荷,一些地区还有海水淡化等储水负荷。这些可控负荷的端电压可以在一定范围内调整,当其端电压发生变化时,它消耗的功率也随之改变。根据上述可控负荷的不同数学模型和物理特性,将可控负荷分为 2 类:第 1 类为电解水制氢等的储气负荷,即电解槽;第 2 类为城市储热负荷、照明负荷等。对于第 1 类负荷而言,当电解槽为碱性电解槽时,忽略电解槽正常工作时的温度和溶液浓度改变,其工作时电压-电流外特性可近似为

$$U = U_0 - U_0 e^{-\alpha I} + R_0 I \quad (15)$$

式中:  $U_0$  为分解电压;  $R_0$  为电解槽内阻;  $I$  为电解电流。

由电解槽外特性可知,当电解槽电压超过分解电压后呈线性关系,可等效为阻值  $R_0$  的电阻负载。

设某电解槽最大工作电压为  $U_{L,\max}$ , 取电解槽线性部分为虚拟储能部分, 此时电解槽电压调节范围为

$$U_0 \leq U \leq U_{\max} \quad (16)$$

电流  $I$  的调节范围为

$$\frac{U_0}{R_0} \leq I \leq \frac{U_{\max}}{R_0} \quad (17)$$

功率  $P$  的调节范围为

$$\frac{U_0^2}{R_0} \leq P \leq \frac{U_{\max}^2}{R_0} \quad (18)$$

对于第 2 类城市热负荷、照明负荷等, 其等效电路可以用电阻  $R_L$  表示。对于该类负荷, 其工作电压允许在额定电压附近偏移, 设允许电压偏移的最小值和最大值分别为  $U_{L,\min}$  和  $U_{L,\max}$ , 则在虚拟储能控制下其电压  $U_L$  的调节范围为

$$U_{L,\min} \leq U_L \leq U_{L,\max} \quad (19)$$

由其等效电阻与电压调节范围可得该类可控负荷的电流  $I_L$  的调节范围和功率  $P_L$  的调节范围分别为

$$\frac{U_{L,\min}}{R_L} \leq I_L \leq \frac{U_{L,\max}}{R_L} \quad (20)$$

$$\frac{U_{L,\min}^2}{R_L} \leq P_L \leq \frac{U_{L,\max}^2}{R_L} \quad (21)$$

由虚拟直流电机的参数特性以及可控负荷的电压电流变化关系可以得到, 在虚拟储能控制下, 虚拟直流电机转速调节范围为

$$\omega_{\min} \leq \omega \leq \omega_{\max} \quad (22)$$

式中,  $\omega_{\max}$  和  $\omega_{\min}$  分别为转速  $\omega$  的最大值和最小值。

由电动机电枢回路方程式(3)、式(4)可得, 转速调节范围为

$$\frac{R_L + R_a}{C_T \Phi} I_{L,\min} \leq \omega \leq \frac{R_L + R_a}{C_T \Phi} I_{L,\max} \quad (23)$$

在所研究的直流微电网系统中, 设定母线电压为 400 V, 可控负荷等效电阻  $R_L=40 \Omega$ , 额定电压为 200 V, 额定角速度  $\omega_0=250 \text{ rad/s}$ , 可控负荷电压调节范围 100~300 V, 根据可控负荷电压调节范围确定可控负荷功率变化范围为 250~2 250 W, 电流调节范围 2.5~7.5 A。

由式(23)可得, 虚拟电机在调节范围内的转子角速度变化范围为 125~375 rad/s。由此可见, 在虚

拟直流电机调节范围内, 通过实时调节  $\omega$  可以实现虚拟直流电机的虚拟储能充放电, 进而调节可控负荷吸收功率的大小, 达到储能装置平衡母线电压的效果; 可以在一定范围内避免储能设备的频繁充放电, 延长储能设备使用寿命, 增加直流微电网的灵活性。

### 3 仿真分析

为了进一步验证上述 VDCM 虚拟储能控制的可行性和有效性, 本文在 MATLAB 中搭建如图 1 所示的光储直流微电网仿真模型。其中, 光伏发电模块采用扰动观察法实现最大功率跟踪控制 (MPPT), 超级电容采用下垂控制稳定母线压, 设置 2 组负荷, 第 1 组普通负荷为恒功率负载采用电压 PI 控制, 第 2 组可控负荷采用上述 VDCM 虚拟储能控制实现母线电压稳压和惯性补偿, 验证负载 VDCM 虚拟储能控制维持母线电压稳定的效果。部分仿真参数如表 1 所示。

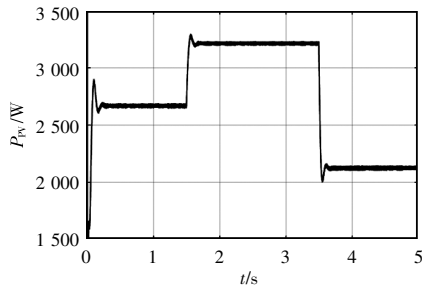
表 1 部分仿真参数数据

Tab. 1 Data about part of simulation parameters

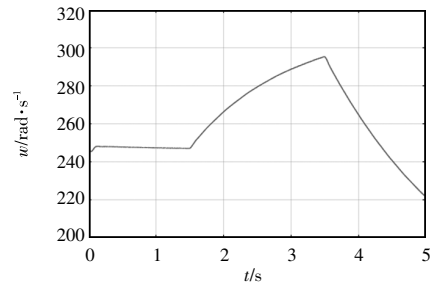
仿真参数	数值	仿真参数	数值
$U_{\text{bat}}/V$	400	$J/(\text{kg}/\text{m}^2)$	5
光伏输出电压 $U_{\text{pv}}/V$	285	阻尼系数 $D$	10
光伏输出电流 $I_{\text{pv}}/A$	21	转矩系数 $C_T$	20
开关频率 $f/\text{kHz}$	20	$\Phi/W_b$	$60 \times 10^{-3}$
超级电容额定电压	96	电枢电阻 $R_a/\Omega$	20
$U_N/V$		额定角速度 $\omega_0/$	250
超级电容初始电压	50	$(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	
$U_0/V$			

#### 3.1 可控负荷虚拟储能能力仿真

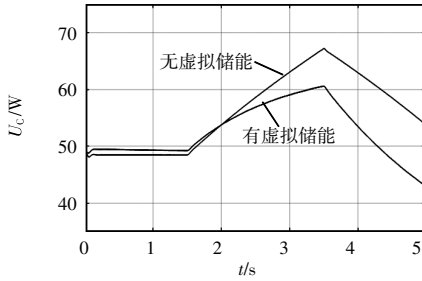
虚拟储能能力的仿真结果如图 5 所示。图 5(a) 为光伏电源在光照强度变化情况下的输出功率曲线, 在无虚拟储能的传统功率控制下, 初始时刻光照强度为  $1\ 000 \text{ W}/\text{m}^2$ , 光伏输出功率 2.7 kW, 2 组负荷吸收功率 2.7 kW。超级电容吸收系统剩余功率并保持系统功率平衡, 其端电压  $U_c$  升高并稳定, 如图 5(b) 所示。在 1.5 s 时, 光照强度突变为  $1\ 200 \text{ W}/\text{m}^2$ , 光伏输出功率增加至 3.3 kW, 由于负荷采用传统电



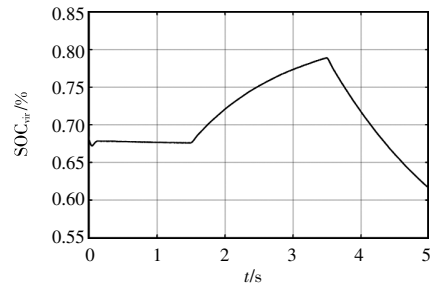
(a) 光伏电源输出功率变化曲线



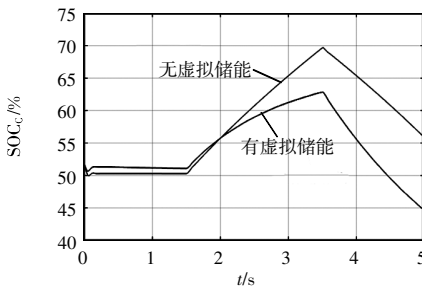
(f) 虚拟直流电机转速变化曲线



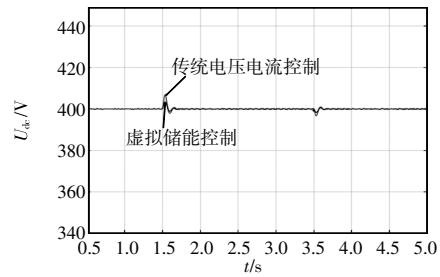
(b) 超级电容输出电压变化曲线



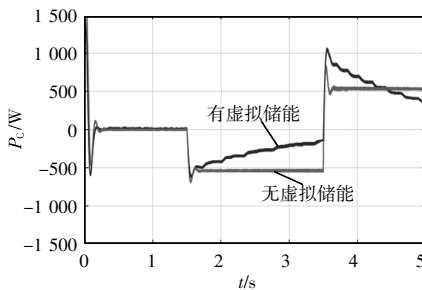
(g) 虚拟储能荷电状态



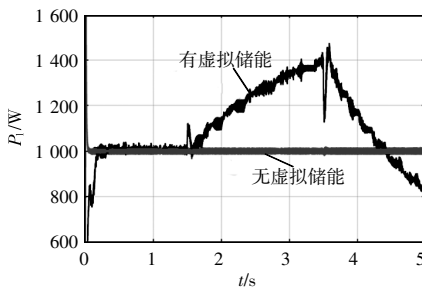
(c) 超级电容荷电状态



(h) 母线电压变化曲线



(d) 超级电容输出功率变化曲线



(e) 可控负荷吸收功率变化曲线

图 5 虚拟储能能力仿真结果

Fig. 5 Simulation results of virtual energy storage capacity

压控制,其消耗功率维持稳定,无法分担超级电容吸收的不平衡功率,超级电容吸收功率增加以平衡母线功率波动,超级电容荷电状态将快速升高。3.5 s 时光照强度降低至 800 W/m<sup>2</sup>, 超级电容输出功率,开始放电以平衡母线缺额功率。在整个光伏输出功率波动过程中,负荷采用传统电压控制,功率维持恒定,超级电容荷电状态变化较快。

在投入虚拟储能后,蓄电池组、超级电容以及负荷的响应曲线与无虚拟储能时不同。初始时刻母线功率平衡,各单元与传统功率控制类似,在 1.5 s 时,光照强度突变为 1 200 W/m<sup>2</sup>, 光伏输出功率增加至 3.3 kW, 超级电容吸收过量功率,  $U_c$  迅速升高, SOC<sub>c</sub> 增加如,图 5(c)所示。VDCM 虚拟储能检

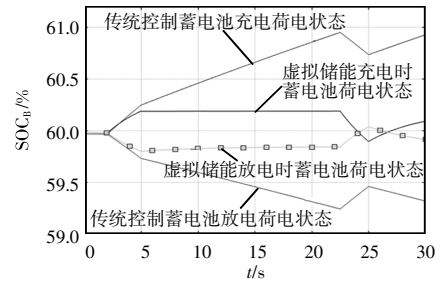
测到  $\Delta U_c$  变化量较大,此时投入 VDCM 虚拟储能,由式(14)可知,在调速控制下,虚拟直流电机转速增加,虚拟储能充电,  $SOC_{vir}$  增大,由图 5(d)、(e)可见,可控负荷吸收功率增加,而此时与传统功率控制相比超级电容吸收功率有所减小,超级电容荷电状态变化比传统功率控制缓慢。3.5 s 时光照强度降低至  $800 \text{ W/m}^2$ ,光伏输出功率降低至  $2.2 \text{ kW}$ ,超级电容输出功率,开始放电以平衡母线功率缺额,同时 VDCM 虚拟储能开始放电,  $SOC_{vir}$  降低。由图 5(f)和(g)可以看出,通过控制虚拟直流电机的转速,可控负荷吸收功率改变,进而减缓超级电容荷电状态的变化速率,同时由于负载变换器的虚拟电机控制的作用在系统发生功率波动时,直流母线电压波动最大值在  $4 \text{ V}$  左右,而传统电压电流控制下的母线电压在  $8 \text{ V}$  左右,如图 5(h)所示,在虚拟直流电机虚拟储能控制调节下,能够对系统功率偏差进行补偿,同时稳定母线电压。

### 3.2 虚拟储能充放电仿真

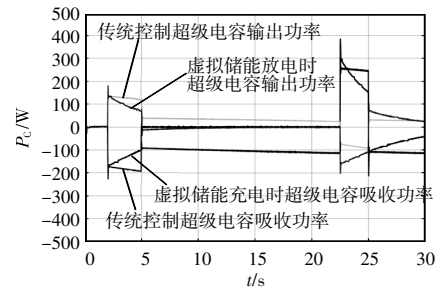
虚拟储能充放电仿真结果如图 6 所示。虚拟储能充电仿真下,光伏电源初始输出功率  $2.7 \text{ kW}$ ,2 组负荷吸收功率  $2.7 \text{ kW}$ ,超级电容吸和蓄电池收多余功率保持系统功率平衡,2.5 s 时由于光照强度增加,光伏输出功率增加到  $3.3 \text{ kW}$ ,系统功率不平衡。在传统电压电流控制下,负荷消耗功率不变,超级电容和蓄电池开始吸收功率维持系统功率平衡,荷电状态持续升高如图 6(a)所示,整个过程超级电容和蓄电池均处于工作状态,对于蓄电池而言持续地充放电会影响其使用寿命。

当光照强度增加,光伏输出功率增加,超级电容和蓄电池开始充电,如图 6(a)所示。荷电状态增加,图 6(c)中可控负荷吸收功率增加,虚拟储能充电。5 s 时光伏输出功率下降到  $3 \text{ kW}$ ,图 6(d)中虚拟电机转速从  $250 \text{ rad/s}$  上升到  $280 \text{ rad/s}$  并达到稳定,图 6(c)可控负荷吸收功率维持在  $1.3 \text{ kW}$ ,超级电容和蓄电池停止充电,图 6(b)中超级电容吸收功率降为 0,此时在虚拟储能调节下系统功率达到平衡。

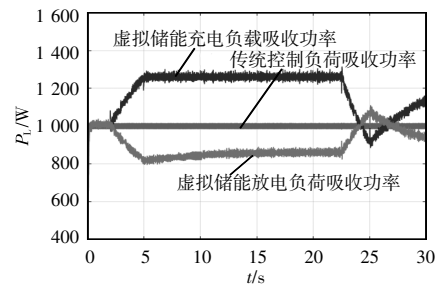
虚拟储能放电仿真下,光伏电源初始输出功率



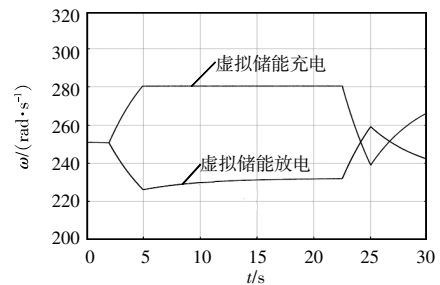
(a) 蓄电池荷电状态



(b) 超级电容输出功率



(c) 可控负荷吸收功率



(d) 虚拟直流电机转速

图 6 虚拟储能充放电仿真结果

Fig. 6 Simulation results of charging and discharging of virtual energy storage

$2.7 \text{ kW}$ ,2 组负荷吸收功率  $2.7 \text{ kW}$ ,超级电容吸和蓄电池不投入工作,系统功率平衡。2.5 s 时由于光照强度降低,光伏输出功率减小到  $2.4 \text{ kW}$ ,系统功率不平衡。在传统电压电流控制下,负荷消耗功率不变,超级电容和蓄电池开始放电维持系统功率平

衡,荷电状态持续降低,如图6(a)所示。

当光照强度降低,光伏输出功率减少,超级电容和蓄电池开始放电,如图6(a)所示,荷电状态减小,图6(c)中可控负荷吸收功率降低,虚拟储能放电。5 s时光伏输出功率上升到2.55 kW,图6(d)中虚拟电机转速从250 rad/s降低到232 rad/s达到稳定,图6(c)可控负荷吸收功率维持在0.85 kW,超级电容和蓄电池停止充电,图6(b)中超级电容吸收功率降为0,此时在虚拟储能调节下系统功率达到平衡。

在系统调节范围内,虚拟直流电机通过调节虚拟角速度改变可控负荷吸收功率,通过虚拟电机等效虚拟电容模拟储能设备的荷电状态,使虚拟直流电机控制的可控负荷具备类似超级电容的储能能力。通过调节虚拟直流电机转速实现虚拟储能的充放电过程,可以在一定程度上分担储能系统的充放电功率,拓展储能系统的功率调节范围。

## 4 结语

在负载变换器VDCM控制的基础上将VDCM控制与可控负荷结合,本文提出基于可控负荷的VDCM虚拟储能控制,利用VDCM的虚拟旋转动能,为直流微电网配置基于可控负荷的虚拟储能设备,并且与传统混合储能设备相结合,提高电力系统的运行稳定性。通过对所提出的控制策略进行理论和仿真分析,验证了该控制策略的可行性和有效性。将VDCM和可控负荷结合的虚拟储能控制中的虚拟转子动能能够模拟储能设备的充放电能量,从而使直流微电网需求侧得到额外的储能备用,可以分担直流微电网的电压调节压力。

### 参考文献:

- [1] Ma W J, Wang Jianhui, Lu Xiaonan, et al. Optimal operation mode selection for a DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6): 2624-2632.
- [2] 孟润泉,刘家赢,文波,等. 直流微网混合储能控制及系统分层协调控制策略[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 186-2193.
- [3] Meng Runquan, Liu Jiaying, Wen Bo, et al. Hybrid energy storage control and system hierarchical coordinated control strategy for DC microgrids [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2186-2193 (in Chinese).
- [3] 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 (in Chinese).
- [4] Dragičević T, Lu Xiaonan, Vasquez J C. 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] 姚良忠,朱凌志,周明,等. 高比例可再生能源电力系统的协同优化运行技术展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 36-43.  
Yao Liangzhong, Zhu Lingzhi, Zhou Ming, et al. Prospects of coordination and optimization for power systems with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 36-43 (in Chinese).
- [6] 朱晓荣,孟凡奇. 含虚拟惯性控制的直流微电网稳定性分析[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 208-218.  
Zhu Xiaorong, Meng Fanqi. Stability analysis of DC microgrid with virtual inertia control [J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 208-218 (in Chinese).
- [7] 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 (in Chinese).
- [8] 张国荣,王新兵,乔龙洋. 直流微网中母线电压对直流负载影响[J]. 电气自动化, 2013, 35(2): 65-67.  
Zhang Guorong, Wang Xinbing, Qiao Longyang. The impact of bus voltage on the DC load for DC micro grid [J]. Electrical Automation, 2013, 35(2): 65-67 (in Chinese).
- [9] 张继红,赵锐,高雷,等. 直流微网母线电压稳定控制策略[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4922-4929.  
Zhang Jihong, Zhao Rui, Gao Lei, et al. DC bus voltage stability control strategy for DC microgrid [J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4922-4929 (in Chinese).

- [10] 郑丽君, 王子鹏, 吕世轩, 等. 基于荷电状态的直流微电网中多储能分级运行控制方法[J]. 电网技术, 2021, 45(3): 1006-1014.  
Zheng Lijun, Wang Zipeng, Lyu Shixuan, et al. Hierarchical operation control of multi-energy storage in DC microgrid based on state of charge [J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 1006-1014 (in Chinese).
- [11] 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): 927-936.  
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): 927-936 (in Chinese).
- [12] 杨翔宇, 肖先勇, 马俊鹏, 等. 基于电感电流反馈的双向 DC-DC 变换器下垂控制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8): 2638-2647.  
Yang Xiangyu, Xiao Xianyong, Ma Junpeng, et al. Droop control of Bi-directional DC-DC converters based on inductive current feedback [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2638-2647 (in Chinese).
- [13] 朱晓荣, 孟凡奇, 谢志云. 基于虚拟同步发电机的直流微网 DC-DC 变换器控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21): 132-140.  
Zhu Xiaorong, Meng Fanqi, Xie Zhiyun. Control strategy of DC-DC converter in DC microgrid based on virtual synchronous generator [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 132-140 (in Chinese).
- [14] 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 (in Chinese).
- [15] Zhi Na, Ding Youguo, Du Liang. Virtual DC generator control strategy based on differential compensation [J]. 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Baltimore, MD, USA, 2019: 1454-1458.
- [16] 张祥宇, 吴奇, 付媛. 含虚拟储能直流微电网的储荷协调控制技术[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(1): 113-120.  
Zhang Xiangyu, Wu Qi, Fu Yuan. Coordinated control technology of energy storage-load for DC microgrid with virtual energy storage [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 113-120 (in Chinese).
- [17] 付媛, 吴奇, 孙星, 等. 直流微电网中的虚拟储能与分区运行控制技术[J]. 太阳能学报, 2020, 41(5): 319-328.  
Fu Yuan, Wu Qi, Sun Xing, et al. Virtual energy storage and partition operation control technology in dc microgrid [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(5): 319-328 (in Chinese).
- [18] 黄清军, 邹云屏, 吴振兴, 等. 模拟直流电机的电力电子负载研究[J]. 电源学报, 2011, 19(6): 20-24.  
Huang Qingjun, Zou Yunping, Wu Zhenxing, et al. Study on power electronics load in DC motor simulator [J]. Journal of Power Supply, 2011, 19(6): 20-24 (in Chinese).
- [19] 辜承林, 陈乔夫, 熊永前. 电机学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.  
Gu Chenglin, Chen Qiaofu, Xiong Yongqian. Electrical Engineering [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2001 (in Chinese).
- [20] 王勉, 唐芬, 赵宇明, 等. 虚拟直流电机的参数自适应控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 148-155.  
Wang Mian, Tang Fen, Zhao Yuming, et al. Parameter adaptive control strategy of virtual DC machine [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 148-155 (in Chinese).



唐鹏

## 作者简介:

唐鹏(1997—),男,硕士研究生。研究方向:直流微电网协调控制运行。E-mail: 2452641279@qq.com。

李红伟(1977—),男,通信作者,博士,教授。研究方向:配电网(微网)分析与控制等。E-mail: 14695743@qq.com。

刘彤(1996—),女,硕士研究生。研究方向:新能源电力系统优化调度。E-mail: 1441935007@qq.com。

甘昌坤(1997—),男,硕士研究生。研究方向:综合能源系统配置优化。E-mail: 834685210@qq.com。

张力丹(1997—),女,硕士研究生。研究方向:直流微电网下垂控制。E-mail: 1543927408@qq.com。