DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.1.136 中图分类号：TM46 文献标志码：A

直流微网储能 DC-DC 变换器的虚拟直流电机控制

王君瑞，白冰超(中国电源学会会员)，赵东琦，乔煊景，朱旭强，豆 帅
(北方民族大学电气信息工程学院，银川 750000)

摘要：针对大量电力电子变换器接入电网，造成微电网惯性与阻尼不足的问题，提出1种适用于直流微电网的虚拟直流电机强化惯性控制策略。首先，在混合储能单元分频控制基础上，引入虚拟直流电机技术，对储能变换器进行控制。其次，根据直流微电网瞬时功率平衡特性，将负荷或光伏输出波动量经一阶高通滤波控制后作为常规虚拟直流电机控制额定功率的附加量。然后，引入与辅助调压功率和超级电容荷电状态相关的调节因子，自适应优化其工作状态。最后，通过搭建实验平台对控制策略进行验证，结果表明该控制策略可以提高直流母线电压的暂态稳定性。

关键词：直流微电网；虚拟直流电机；强化惯性；荷电状态

Virtual DC Machine Control of DC Microgrid Energy Storage DC-DC Converter

WANG Junrui, BAI Bingchao, *Member*, *CPSS*, ZHAO Dongqi, QIAO Xuanjing, ZHU Xuqiang, DOU Shuai
(School of Electrical and Information Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750000, China)

Abstract: Aimed at the problem of insufficient inertia and damping of a microgrid resulting from a large number of power electronic converters connected to power grid, a virtual DC machine enhanced inertia control strategy suitable for DC microgrid is proposed. First, based on the frequency division control of the hybrid energy storage unit, the virtual DC machine technology is introduced to control the energy storage converter. Second, according to the instantaneous power balance characteristics of DC microgrid, the fluctuation of load or photovoltaic output controlled by first-order high-pass filtering is taken as an additional amount of rated power controlled by the conventional virtual DC machine. Third, a regulation factor related to the auxiliary voltage regulation power and the state-of-charge of the supercapacitor is introduced to adaptively optimize its working state. Finally, the control strategy was verified by constructing an experimental platform, and results show that this strategy can improve the transient stability of DC bus voltage.

Keywords: DC microgrid; virtual DC machine; enhanced inertia; state-of-charge

收稿日期：2023-07-17；**修回日期：**2023-09-19；**录用日期：**2023-09-22；**网络首发日期：**2023-12-05
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52167004)；宁夏回族自治区智能装备与精密检测技术研究应用创新团队资助项目(2022BSB03104)；北方民族大学创新项目(YCX23125)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52167004; Ningxia Hui Autonomous Region Intelligent Equipment and Precision Detection Technology Research and Application Innovation Team under the grant 2022BSB03104; North Minzu University Innovation Project under the grant YCX23125

近年来，由于能源短缺问题日益严重，以新能源为主的微电网系统得到快速发展，其中，直流微电网因无需考虑频率、无功功率等因素，已经成为国内外研究的热点[1-2]，但新能源发电仍存在间歇性和波动性等问题，甚至影响到直流微电网的安全运行。国内外学者根据同步发电机在交流微电网中的应用[3-5]，针对直流微电网 DC-DC 变换器，提出了虚拟直流电机 VDCM(virtual DC machine)控制，以增强系统的惯性和阻尼[6-7]。然而，单纯依

靠控制策略增加的惯性有限，储能设备能够提供更加充足的等效惯性，在平抑负荷侧波动和消纳新能源方面发挥着重要作用，所以 VDCM 控制常与储能技术相结合，通过提升储能变换器的阻尼、惯性特性[8-11]，来提高母线电压的暂态稳定性。

新能源发电系统往往需要对储能单元进行频繁充放电，这将导致储能设备出现损坏，降低其使用寿命。文献[12]采用混合储能系统，将混合储能单元分频控制与 VDCM 控制相结合，在充分发挥各储能单元优势的同时，提升直流母线电压的暂态稳定性；文献[13]针对多储能单元并联运行时功率分配不协调的问题，提出 1 种基于 VDCM 的荷电状态 SOC(state-of-charge)均衡控制策略，其中，VDCM 控制可以减小功率波动对母线电压的影响，SOC 均衡控制能够实现储能单元 SOC 及能量均衡。

目前，关于微网惯性强化主要是采用参数自适应的控制策略来提高 VDCM 的运行性能。其中，文献[14]提出惯性系数和阻尼系数的自适应控制，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，并给出惯性系数和阻尼系数的自适应调节方程；文献[15]采用基于模糊神经网络的虚拟惯量自适应控制策略，以母线电压偏离量和变化率作为输入变量来调整惯性系数的大小，从而改善母线电压响应特性；文献[16]指出惯性系数和阻尼系数与系统的稳定性密切相关，如果选取不当，可能会引起系统小信号不稳定等问题。

为解决上述问题，本文提出 1 种无需改变惯性、阻尼系数的 VDCM 强化惯性控制方法，该方法是在 VDCM 固有调压能力的基础上，增加与系统电压偏差量相关的辅助调压功率，使之可以在负荷扰动后提供更多的调压功率，并在此基础上考虑储能单元 SOC 约束条件，避免储能单元频繁过充/过放。最后，搭建光储微网实验平台，验证了所提控制策略的有效性。

1　光储直流微网结构

光储直流微网系统由光伏阵列、混合储能单元和直流负荷组成，其结构如图 1 所示。光伏阵列通过 Boost 变换器与直流母线相连，并始终工作于最大功率点追踪 MPPT(maximum power point tracking)模式。混合储能单元通过双向 DC-DC 变换器接入直流母线，实现储能单元与直流母线之间的能量流动。直流负荷直接与微电网直流母线相连接，使负荷可以从微电网中获取所需能量。光储微网中各单元之间既相互独立又相互作用，共同实现微网系统的安全运行。

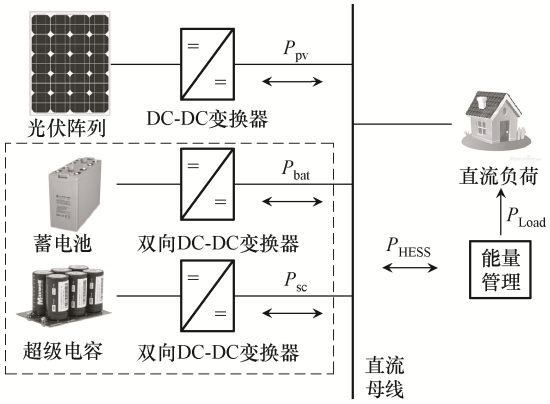


图 1　光储直流微网结构

Fig. 1 Structure of photovoltaic energy storage DC microgrid

当光储微网系统运行在孤岛模式时，功率流动表达式为

$$\begin{cases} P_{pv} + P_{HESS} = P_{Load} \\ P_{sc} + P_{bat} = P_{HESS} \end{cases} \tag{1}$$

式中：P_{pv} 为光伏单元输出功率；P_{HESS} 为混合储能单元所承担的功率；P_{Load} 为负载功率；P_{sc} 为超级电容所承担的功率；P_{bat} 为蓄电池所承担的功率。

2　VDCM 控制策略

2.1　VDCM 的基本控制结构

虚拟直流电机的原理是将双向 DC-DC 变换器等效为 1 个二端口网络，一般地，二端口的 U_1 和 I_1 接储能单元的直流输出端，二端口的 U_2 和 I_2 接公共的直流母线，再通过模拟直流电机的机械方程与电枢方程，从而使双向 DC-DC 变换器的外特性表现出与直流电机一致的下垂特性和动态特性。其原

理如图 2 所示。

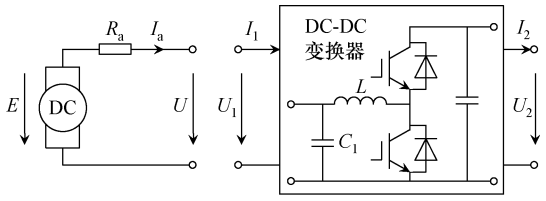


图 2 虚拟直流电机原理

Fig. 2 Schematic of virtual DC machine

由图 2 可知，直流电机的电枢回路方程为

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

式中：E 为直流电机的电枢电动势；R_a 为直流电机电枢回路的等效电阻；I_a 为直流电机电枢电流；U 为直流电机端电压；C_T 为直流电机的转矩系数；Φ 为直流电机的磁通；ω 为直流电机的实际角速度。

直流电机的机械方程为

$$J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = \frac{P_m}{\omega_n} - \frac{P_e}{\omega_n} - D(\omega - \omega_n) \tag{3}$$

式中：J 为转动惯量；D 为阻尼系数；P_m 为 VDCM 的机械功率；P_e 为 VDCM 的电磁功率；ω_n 为直流电机的额定角速度。

根据直流电机的工作原理可知，当负载或光伏功率变化导致直流电机输出的机械功率发生波动时，为了保持输出电压稳定，直流电机会自动调整机械角速度 ω，并相应地改变感应电动势，从而提高整个系统的稳定性和可靠性。

2.2 VDCM 惯性特性分析

对于直流微电网，为了使直流母线电压 U_{dc} 具备和直流电机转子相同的惯性响应能力，以阻碍自身电压因功率变化而产生的突变，可以将直流母线电压 U_{dc} 和 ω 进行类比。将式(3)中 ω_n 类比为直流母线电压额定值 U_{dc}^*，P_m 类比为维持直流母线稳定的额定功率 P_n，P_e 类比为维持直流母线稳定的实际输出功率 P_o。根据式(2)和式(3)可推导得出 VDCM 控制方程近似为

$$P_n - P_o - \frac{D\omega_n}{C_T\Phi}(U_{dc} - U_{dc}^*) = \frac{J\omega_n}{C_T\Phi}\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t} \approx \frac{J\omega_n}{C_T\Phi}\frac{\mathrm{d}U_{dc}}{\mathrm{d}t} \tag{4}$$

式(4)反应了动态调节过程中，直流微电网的瞬时功率平衡特性。直流微电网的有功功率变化量 $\Delta P_o = P_o - P_n$ 由 2 部分组成：一是由直流微电网下垂控制引起的有功功率变化量 $(D\omega_n/C_T\Phi)(U_{dc} - U_{dc}^*)$，它主要是为直流微电网提供调压时所需的下垂功率；二是虚拟转子吸收/释放的瞬时功率 $(J\omega_n/C_T\Phi)\cdot(\mathrm{d}U_{dc}/\mathrm{d}t)$，它主要是为直流母线电压调节提供惯性功率，通常由储能单元提供，其有功功率突变量表达式为

$$-\frac{D\omega_n}{C_T\Phi}\Delta U_{dc}(t) - \frac{J\omega_n}{C_T\Phi}\frac{\mathrm{d}\Delta U_{dc}(t)}{\mathrm{d}t} = \Delta P_o(t) \tag{5}$$

由式(5)可知，当负荷或光伏功率突变时，直流母线电压开始偏离额定值，此时 ΔU_{dc} 与 $\mathrm{d}\Delta U_{dc}/\mathrm{d}t$ 同号，且相互叠加共同维持微电网瞬时功率平衡。由于 VDCM 的无差控制，母线电压开始向额定值恢复，此时 ΔU_{dc} 与 $\mathrm{d}\Delta U_{dc}/\mathrm{d}t$ 异号，VDCM 吸收/释放的功率逐渐减小，直到母线电压恢复到额定值时 VDCM 自动退出直流母线电压调节。

基于上述分析，本文提出 1 种提高微网惯性的方法，即在 VDCM 固有调压能力的基础上增加与系统电压偏差量相关的辅助调压功率 ΔP，使之可以在负荷扰动后提供更多的调压功率，其表达式为

$$-\frac{D\omega_n}{C_T\Phi}\Delta U_{dc}(t) - \frac{J\omega_n}{C_T\Phi}\frac{\mathrm{d}\Delta U_{dc}(t)}{\mathrm{d}t} + \Delta P(t) = \Delta P_o(t) \tag{6}$$

2.3 VDCM 的强化惯性控制策略

根据一阶高通滤波器与一阶惯性环节叠加和为 1 的思想，可得

$$\frac{1}{Ts+1}\frac{\Delta P}{s} + \frac{Ts}{Ts+1}\frac{\Delta P}{s} = \frac{\Delta P}{s} \tag{7}$$

式中：T 为滤波时间常数；$\Delta P/s$ 为阶跃负荷数学模型。

对比式(5)与式(7)，由于 $(D\omega_n/C_T\Phi)\Delta U_{dc}(t)$ 代表下垂功率，为一阶惯性特性[17]，而 $\Delta P/s$ 对应于 ΔP_o，为负荷与光伏出力的差额波动值，所以惯性功率与负荷和光伏出力差额经一阶高通滤波环节提取的高频分量类似。

综上所述，可得 VDCM 强化惯性控制策略如下。

首先，将负荷与光伏出力差额的功率($P_{\mathrm{Load}}-P_{\mathrm{pv}}$)经一阶高通滤波器提取高频分量 P_{fh} 后，叠加到 VDCM 额定调压功率 P_{n} 中，即

$$\begin{cases} P_{\mathrm{m}} = P_{\mathrm{n}} + P_{\mathrm{fh}} \\ P_{\mathrm{fh}} = (P_{\mathrm{Load}} - P_{\mathrm{pv}})\dfrac{Ts}{Ts+1} \end{cases} \tag{8}$$

然后，根据直流微电网动态过程的瞬时功率平衡特性，利用一阶高通滤波器对负荷与光伏出力差额中的高频分量进行提取，再经过一阶惯性环节与原有分量叠加，即为该控制策略辅助调压功率增量 P_{fhx}。

最后，二者共同作用强化 VDCM 惯性，提升微网的稳定性，即

$$\begin{cases} P_{\mathrm{m}} = P_{\mathrm{n}} + P_{\mathrm{fhx}} \\ P_{\mathrm{fhx}} = (P_{\mathrm{Load}} - P_{\mathrm{pv}})\left(\dfrac{T_1 s}{T_1 s+1} + \dfrac{T_2 s}{T_2 s+1}\cdot\dfrac{1}{T_3 s+1}\right) \end{cases} \tag{9}$$

式中，T_1、T_2、T_3 分别为不同滤波器的时间常数。

VDCM 强化惯性控制策略如图 3 所示。

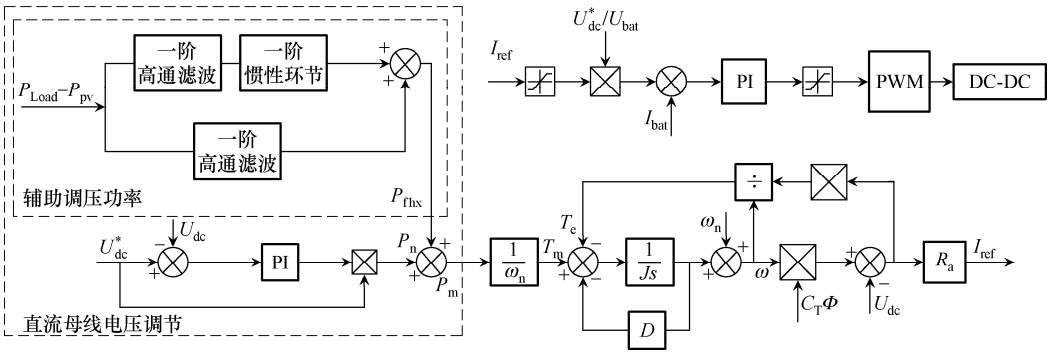


图 3　VDCM 强化惯性控制策略

Fig. 3 Enhanced inertial control strategy based on VDCM

2.4 VDCM 小信号模型分析

建立图 2 中双向 DC-DC 变换器的小信号模型如图 4 所示，图中：U_{in}、U_{dc} 分别为输入、输出电压；I_{L}、I_{o} 分别为输入、输出电流。由图 3 和图 4 可建立加入 VDCM 控制后的变换器小信号模型，如图 5 所示。

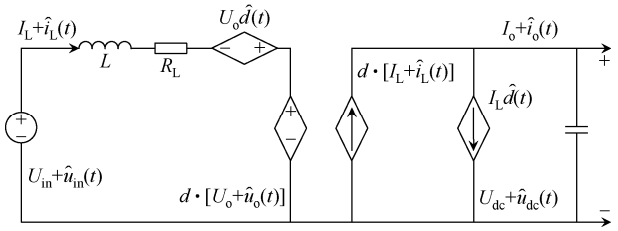


图 4　双向 DC-DC 变换器小信号模型

Fig. 4 Small signal model of bidirectional DC-DC converter

由图 4 可得双向 DC-DC 变换器的小信号模型为

$$\begin{cases} Ls\hat{i}_{\mathrm{in}} = \hat{u}_{\mathrm{in}} - (1-d)\hat{u}_{\mathrm{dc}} - R_{\mathrm{L}}\hat{i}_{\mathrm{in}} + \hat{d}U_{\mathrm{dc}} \\ Cs\hat{u}_{\mathrm{dc}} = (1-d)\hat{i}_{\mathrm{in}} - \hat{i}_{\mathrm{o}} - \hat{d}I_{\mathrm{in}} \end{cases} \tag{10}$$

式中：L 为变换器的滤波电感；C 为变换器的滤波电容；d 为开关管占空比；R_{L} 为等效串联电阻；I_{in} 为变换器输入电流的稳态值；$\hat{d}$ 为开关管占空比的扰动信号；$\hat{u}_{\mathrm{in}}$、$\hat{u}_{\mathrm{dc}}$ 分别为变换器输入、输出电压的扰动信号；$\hat{i}_{\mathrm{in}}$、$\hat{i}_{\mathrm{o}}$ 分别为变换器输入、输出电流的扰动信号。

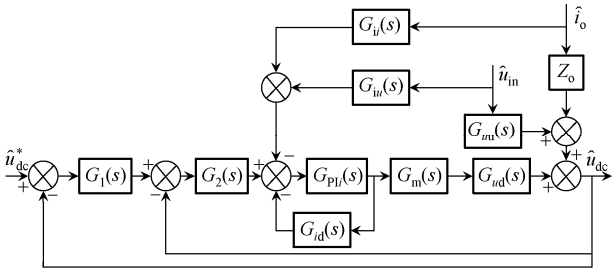


图 5　VDCM 控制小信号模型

Fig. 5 Small signal model based on VDCM control

根据图 4 和图 5 可得主要环节的传递函数为

$$G_1(s) = \frac{U_{\mathrm{dc}}^* C_{\mathrm{T}}\Phi R_{\mathrm{a}}(k_{pu}s + k_{iu})}{s\omega_{\mathrm{n}}[JR_{\mathrm{a}}s + (C_{\mathrm{T}}\Phi)^2 + DR_{\mathrm{a}}]} \tag{11}$$

$$G_2(s) = U_{\mathrm{dc}}^* / (R_{\mathrm{a}}U_{\mathrm{bat}}) \tag{12}$$

$$G_{\mathrm{PI}i} = (sk_{pi} + k_{ii})/s \tag{13}$$

$$G_{\mathrm{m}} = 1/V_{\mathrm{m}} \tag{14}$$

$$G_{id} = \frac{\hat{i}_{\mathrm{in}}}{\hat{d}} = \frac{(1-d)I_{\mathrm{in}} + CU_{\mathrm{dc}}s}{LCs^2 + R_{\mathrm{L}}Cs + (1-d)^2} \tag{15}$$

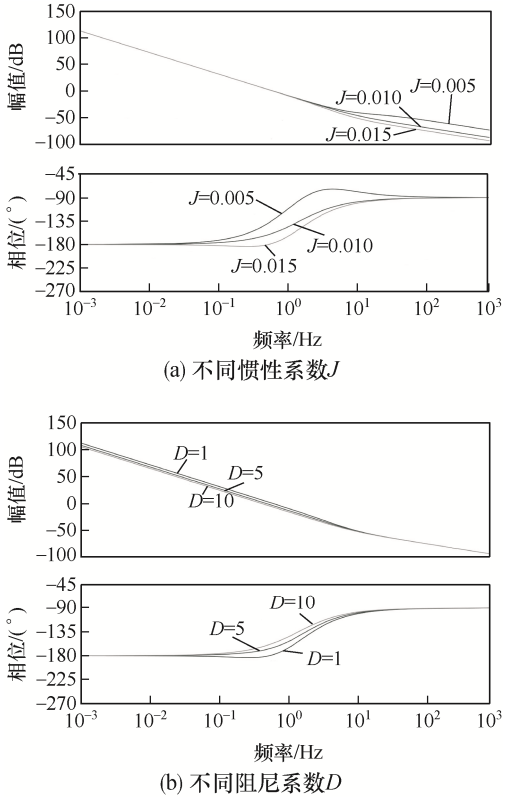
$$G_{ud}=\frac{\hat{u}_{dc}}{\hat{d}}=\frac{(1-d)U_{dc}-(R_L+Ls)I_{in}}{LCs^2+R_LCs+(1-d)^2} \tag{16}$$

式中：k_{pu}、k_{iu}分别为电压环的比例、积分系数；k_{pi}、k_{ii}分别为电流环的比例、积分系数；U_{bat}为蓄电池电压；V_m为载波峰值。

由图 5 可以得到加入 VDCM 控制后的开环传递函数为

$$G_{uo}(s)=\frac{G_1(s)G_2(s)G_{PIi}(s)G_m(s)G_{ud}(s)}{1+G_{PIi}(s)G_{id}(s)+G_2(s)G_{PIi}(s)G_m(s)G_{ud}(s)} \tag{17}$$

根据式(17)绘制加入 VDCM 控制策略的系统伯德图，分析惯性系数 J 和阻尼系数 D 对系统动态性能的影响。图 6 为不同 J 和 D 值下 VDCM 控制器的伯德图。可以看出，惯性系数 J 决定高频段的响应效果，且在一定范围内随着 J 值的增大，系统的惯性变大，平抑系统干扰能力增强，但当 J 的取值过大时，会导致系统的惯性过大，从而影响系统的动态调节能力；阻尼系数 D 主要决定低频段的响应效果，且随着 D 值的不断增大，系统的相角裕量增大，稳定性提升，但系统响应速度变慢。因此，为得到相对最佳性能，本文中惯性系数 J 和阻尼系数 D 的取值分别为 0.01 和 10。



(a) 不同惯性系数J

(b) 不同阻尼系数D

图 6 不同 J、D 下 VDCM 控制器的伯德图

Fig. 6 Bode diagram of VDCM controller under different values of J and D

3 混合储能控制策略

为减小功率波动对直流母线电压的影响，将混合储能分频控制与虚拟直流电机强化惯性控制相结合，其控制策略结构如图 7 所示。

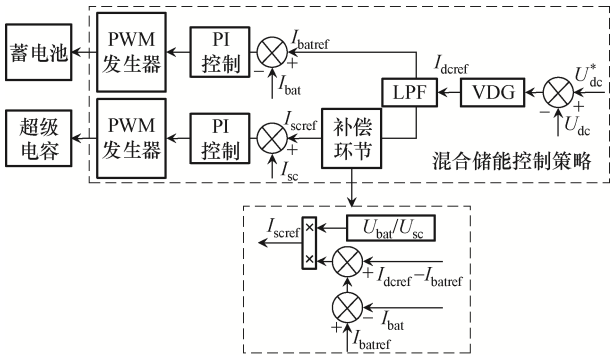


图 7 基于 VDCM 的混合储能控制策略

Fig. 7 Hybrid energy storage control strategy based on VDCM

混合储能分频控制即一阶低通滤波控制，其工作原理是将混合储能单元所需要承担的功率 P_{HESS} 借助低通滤波器 LPF(low pass filter)划分为高频段分量 P_{sc} 和低频段分量 P_{bat}，同时对超级电容引入功率补偿环节，即将少量流入蓄电池的高频误差补偿给超级电容，并引入蓄电池与超级电容的电压比值 U_{bat}/U_{sc} 实时修正超级电容的基准电流，其功率分配公式为

$$\begin{cases} P_{sc}=\dfrac{Ts}{Ts+1}P_{HESS} \\ P_{bat}=\dfrac{1}{Ts+1}P_{HESS} \end{cases} \tag{18}$$

超级电容的基准电流 I_{scref} 修正为

$$I_{scref}=(I_{dcref}-I_{bat})\frac{U_{bat}}{U_{sc}} \tag{19}$$

式中：I_{dcref}为直流母线电流参考值；I_{bat}为蓄电池实际电流值。

由于超级电容能量密度较小，当超级电容荷电

状态不佳时，辅助调压功率 P_{fhx} 所引入的额外惯性功率会进一步恶化超级电容的荷电状态。因此，引入与辅助调压功率和超级电容荷电状态相关的调节因子 h，避免超级电容过充/过放，即

$$h=\begin{cases}0 & S_{\mathrm{sc}}\geqslant S_{\mathrm{sc,max}}\text{且}P_{\mathrm{fhx}}<0\\ \dfrac{S_{\mathrm{sc}}-S_{\mathrm{sc,max}}}{S_{\mathrm{sc,high}}-S_{\mathrm{sc,max}}} & S_{\mathrm{sc,high}}\leqslant S_{\mathrm{sc}}\leqslant S_{\mathrm{sc,max}}\text{且}P_{\mathrm{fhx}}<0\\ 1 & \text{其他}\\ \dfrac{S_{\mathrm{sc}}-S_{\mathrm{sc,min}}}{S_{\mathrm{sc,low}}-S_{\mathrm{sc,min}}} & S_{\mathrm{sc,min}}\leqslant S_{\mathrm{sc}}\leqslant S_{\mathrm{sc,low}}\text{且}P_{\mathrm{fhx}}>0\\ 0 & S_{\mathrm{sc}}\leqslant S_{\mathrm{sc,min}}\text{且}P_{\mathrm{fhx}}>0\end{cases}\tag{20}$$

式中：S_{sc} 为超级电容 SOC；$S_{\mathrm{sc,max}}$、$S_{\mathrm{sc,min}}$ 分别表示充/放电时超级电容 SOC 的最大值、最小值；$S_{\mathrm{sc,high}}$、$S_{\mathrm{sc,low}}$ 分别表示超级电容过度充/放电的最大、最小限制值。

引入调节因子 h 后系统可以工作在 3 种模式，见表 1。

表 1　VDCM 模式分类

Tab. 1 Classification of VDCM patterns

模式	h	P_{m}
常规 VDCM	0	P_{n}
自适应 VDCM	0~1	$P_{\mathrm{n}}+hP_{\mathrm{fhx}}$
改进 VDCM	1	$P_{\mathrm{n}}+P_{\mathrm{fhx}}$

4　实验验证

为进一步验证所提控制策略的正确性，搭建了 1 台基于 TMS320F28335 的光储直流微网实验样机，如图 8 所示。光储直流微网实验样机主要参数见表 2。

4.1 负载突变实验

设定初始光照强度为 550 W/m^2，光伏功率为 65 W，负载功率为 40 W。当系统工作 2 s 时，切入负载，负载功率由 40 W 上升到 80 W；当系统工作 4 s 时，切出负载，负载功率由 80 W 下降到 40 W，整个工作时间段内光照强度未发生变化。此时超级电容器 SOC 为 50%，无需考虑其荷电状态，实验

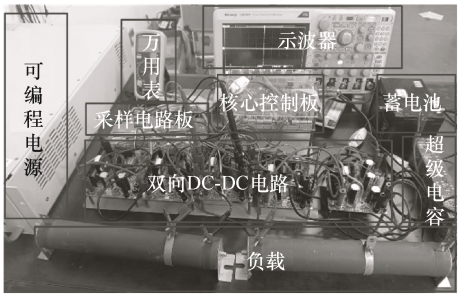


图 8　光储微网实验样机

Fig. 8 Experimental prototype of photovoltaic energy storage microgrid

表 2　系统实验样机参数

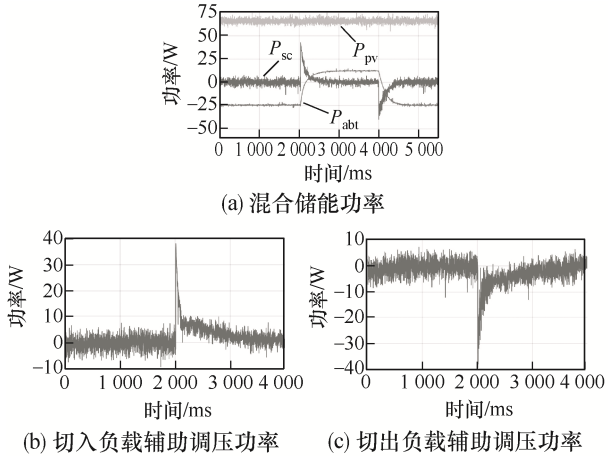
Tab. 2 Parameters of experimental prototype

参数	数值	参数	数值
U_{dc}^{*}/V	40	D	10
U_{bat}/V	12	$C_{\mathrm{T}}\Phi$/(Nm·A^{-1})	0.127
U_{sc}/V	16	ω_{n}/(rad·s^{-1})	100π
L/μH	470	R_{a}/Ω	0.2
C/μF	500	[$S_{\mathrm{sc,min}}$, $S_{\mathrm{sc,low}}$]	[0.1, 0.3]
J/(kg·m^2)	0.01	[$S_{\mathrm{sc,high}}$, $S_{\mathrm{sc,max}}$]	[0.7, 0.9]

结果见图 9。由图 9(a)可以得出，当负载功率突变时，超级电容快速反应，承担高频分段功率，而蓄电池则是缓慢发生变化，承担低频分段功率，充分发挥各储能单元自身优势。图 9(b)、(c)为本文控制策略中所引入的辅助调压功率，由下垂功率和惯性功率 2 部分叠加而成，当负载功率突变时，二者共同作用提升微网惯性。

图 10、图 11 分别为切入/切出负载时一阶低通滤波控制、常规 VDCM 控制及改进 VDCM 控制的实验波形图。由实验结果可知，当负载功率发生变化时：(1)一阶低通滤波控制由于没有阻尼和惯性的调节，直流母线电压会产生大幅度波动，切入/切出负载时电压偏差量分别为 2.5 V 和 3.4 V；(2)常规 VDCM 控制由于引入了阻尼和惯性的环节，电压波动有了显著的减缓过程，切入/切出负载时电压偏差量分别为 0.9 V 和 0.8 V，模拟了直流电机的外特性；(3)改进 VDCM 控制由于在常规 VDCM 控制基础上引入辅助调压环节，可以提供更多的调压功率，进一步减小母线电压波动，此时电压偏差量分别为 0.78 V 和 0.67 V，小于未引入惯性强化控制

的电压偏差量。

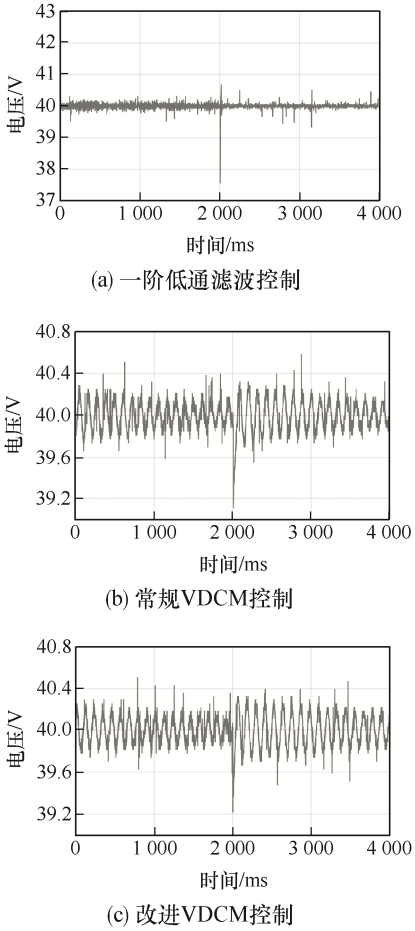


(a) 混合储能功率

(b) 切入负载辅助调压功率 (c) 切出负载辅助调压功率

图 9 负载突变功率实验结果

Fig. 9 Results of load mutation power experiment



(a) 一阶低通滤波控制

(b) 常规VDCM控制

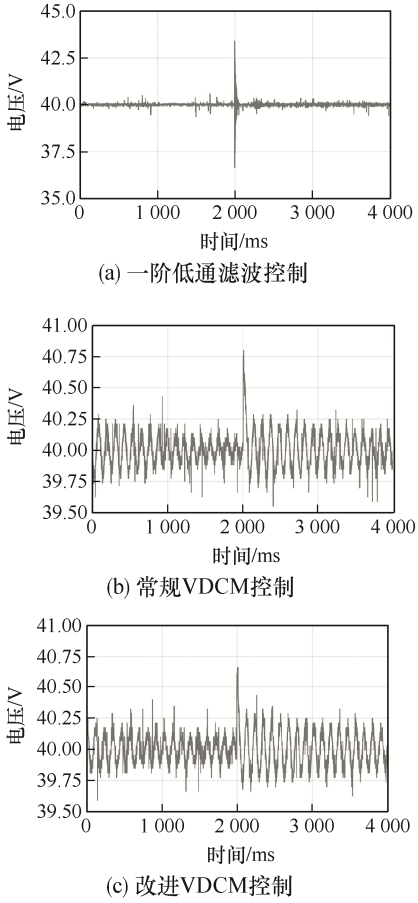
(c) 改进VDCM控制

图 10 切入负载突变电压实验结果

Fig. 10 Experimental results of voltage under cut-in load mutation

4.2 自适应 VDCM 模式实验

为验证自适应 VDCM 控制对母线电压的优化，在图 9(a)功率变化情况下，假设以下 2 种工况：工况 1，切入负载，负载功率由 40 W 上升到 80 W，此时超级电容器 SOC 为 27%，处于自适应 VDCM 模式；工况 2，切出负载，负载功率由 80 W 下降到 40 W，此时超级电容器 SOC 为 76%，处于自适应 VDCM 模式。对应实验结果如图 12、图 13 所示。



(a) 一阶低通滤波控制

(b) 常规VDCM控制

(c) 改进VDCM控制

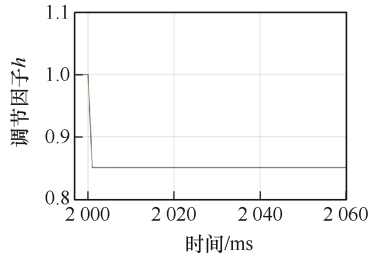
图 11 切出负载突变电压实验结果

Fig. 11 Experimental results of voltage under cut-out load mutation

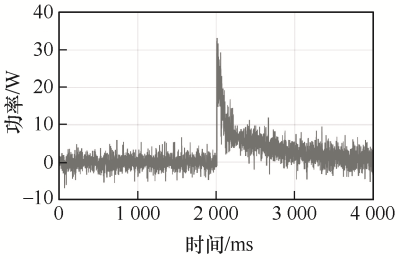
由图 12 和图 13(a)、(b)可以看出，当超级电容荷电状态不佳时，系统会自动切换到自适应 VDCM 控制模式，并引入相应的调节因子 h，以减少辅助调压功率 P_{fhx}，优化超级电容荷电状态。

由图 12 和图 13(c)可以看出，随着调节因子 h 的不断降低，负载变化时引入的辅助调压功率逐渐减小，此时 2 种工况下直流母线电压偏差量分别为 0.81 V 和 0.71 V，大于改进 VDCM 控制的电压偏差量。

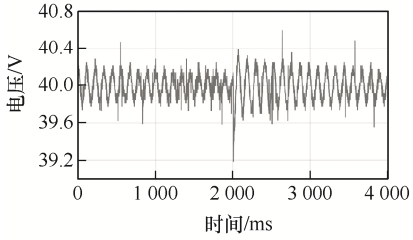
多种工况实验结果对比见表 3，当超级电容荷电状态不佳时，自适应 VDCM 控制会引入调节因子 h，以减小辅助调压功率，优化超级电容荷电状



(a) 调节因子



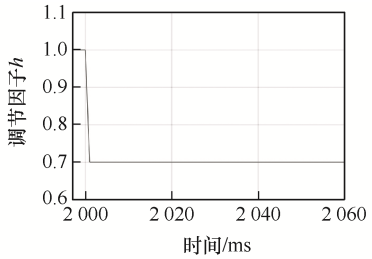
(b) 辅助调压功率



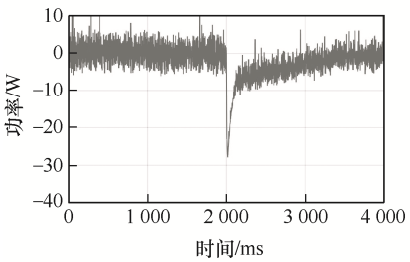
(c) 自适应VDCM控制

图 12　工况 1 自适应 VDCM 控制实验结果

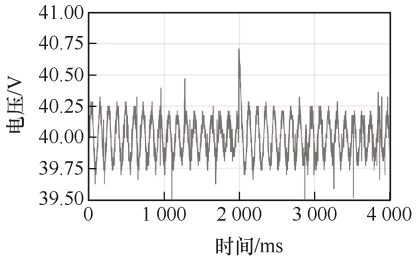
Fig. 12 Experimental results under adaptive VDCM control in condition 1



(a) 调节因子



(b) 辅助调压功率



(c) 自适应VDCM控制

图 13　工况 2 自适应 VDCM 控制实验结果

Fig. 13 Experimental results under adaptive VDCM control in condition 2

表 3　自适应 VDCM 控制

Tab. 3 Adaptive VDCM control

运行工况	调节因子 h	母线电压偏差量 ΔU_{dc}/V
切入负载，S_{sc}=27%	0.85	0.81
切出负载，S_{sc}=76%	0.70	0.71
切入负载，S_{sc}=24%	0.70	0.83
切出负载，S_{sc}=80%	0.50	0.74

态，但同时会导致系统惯性强化效果有所减弱，母线电压偏差量增大。

5　结论

本文针对直流微电网惯性与阻尼不足的问题，提出 1 种 VDCM 强化惯性控制策略，得出结论如下。

(1)VDCM 控制可使 DC-DC 变换器具有与直流电机相一致的下垂特性和动态特性，提高直流微电网的阻尼和惯性，从而增强直流母线电压的惯性和稳定性。

(2)本文提出的 VDCM 强化惯性控制方法，是在常规 VDCM 控制结构的基础上，增加与系统电压偏差幅值和微分量相关的辅助调压功率，等效于增强了 VDCM 的惯性和调压能力，进一步减小负荷扰动后的系统电压偏差。

(3)本文采用混合储能系统，由蓄电池承担低频功率，由超级电容器承担高频功率，解决了单一储能电池无法同时承担功率密度和能量密度的问题。同时，引入了与辅助调压功率和超级电容荷电

状态相关的调节因子，使系统可以在 3 种模式中自适应切换，在提高直流母线电压暂态稳定性的同时，优化超级电容荷电状态。

参考文献：

[1] 董旭, 徐永海, 马宁, 等. 基于自适应特性的直流微电网双因子下垂控制策略研究[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 193-202.
Dong Xu, Xu Yonghai, Ma Ning, et al. Dual-factor droop control strategy for DC microgrid based on adaptive characteristics [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 193-202. (in Chinese)

[2] 付媛, 刘承帅, 王耀铎, 等. 直流微电网的储-荷虚拟直流电机优化控制技术[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(4): 23-29.
Fu Yuan, Liu Chengshuai, Wang Yaoduo, et al. Optimal control technology of storage load virtual DC machine in DC microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(4): 23-29. (in Chinese)

[3] Sun Kun, Yao Wei, Wen Jinyu, et al. A two-stage simultaneous control scheme for the transient angle stability of VSG considering current limitation and voltage support [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(3): 2137-2150.

[4] Li Chang, Yang Yaqian, Mijatovic N, et al. Frequency stability assessment of grid-forming VSG in framework of MPME with feedforward decoupling control strategy [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(7): 6903-6913.

[5] Chen Shimiao, Sun Yao, Han Hua, et al. A modified VSG control scheme with virtual resistance to enhance both small-signal stability and transient synchronization stability [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(5): 6005-6014.

[6] Pang Yubin, Qu Xiaohui, Ren Zijun, et al. A novel coordinated control strategy for LCC/VSC hybrid DC distribution power system [J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2023, 13(2): 629-636.

[7] Lin Gang, Ma Junjie, Li Yong, et al. A virtual inertia and damping control to suppress voltage oscillation in islanded DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3): 1711-1721.

[8] Navarro-Rodríguez Á, García P, Gómez-Aleixandre C, et al. Cooperative primary control of a hybrid AC/DC microgrid based on AC/DC virtual generators [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(4): 2837-2850.

[9] 王书征, 张少文, 朱海铭, 等. 基于改进弗雷歇算法的虚拟直流电机等效惯量计算[J]. 电力工程技术, 2023, 42(1): 218-225.
Wang Shuzheng, Zhang Shaowen, Zhu Haiming, et al. Equivalent inertia calculation of virtual DC motor based on improved Frecher algorithm [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1): 218-225. (in Chinese)

[10] Zhi Na, Ming Xu, Ding Youguo, et al. Power-loop-free virtual DC machine control with differential compensation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(1): 413-422.

[11] 唐鹏, 李红伟, 刘彤, 等. 虚拟直流电机的虚拟储能控制策略[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 260-268.
Tang Peng, Li Hongwei, Liu Tong, et al. Virtual energy storage control strategy for virtual DC motor [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 260-268. (in Chinese)

[12] 陈景文, 周媛, 李晓飞, 等. 光储直流微网混合储能控制策略研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(1): 14-20, 87.
Chen Jingwen, Zhou Yuan, Li Xiaofei, et al. Hybrid energy storage control strategy of optical storage DC microgrid [J]. Smart Power, 2022, 50(1): 14-20, 87. (in Chinese)

[13] Zhi Na, Ding Ke, Du Liang, 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.

[14] Zhang Yi, Sun Qiuye, Zhou Jianguo, et al. Coordinated control of networked AC/DC microgrids with adaptive virtual inertia and governor-gain for stability enhancement [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(1): 95-110.

[15] 崔健, 房建军. 虚拟直流电机技术参数分析及虚拟惯

量自适应控制[J]. 电源学报, 2022, 20(6): 192-202.
Cui Jian, Fang Jianjun. Parameters analysis and virtual inertia adaptive control of virtual DC motor technique [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(6): 192-202. (in Chinese)

[16] 张纯江, 暴云飞, 孟宪慧, 等. 直流微网储能DC/DC变换器的自适应虚拟直流电机控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 12-20.
Zhang Chunjiang, Bao Yunfei, Meng Xianhui, et al. Adaptive virtual DC machine control for a DC microgrid energy storage DC/DC converter [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 12-20. (in Chinese)

[17] 赵伟, 李雄, 乔仁飞, 等. 基于混合储能的孤岛微网VSG控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 33-40.
Zhao Wei, Li Xiong, Qiao Renfei, et al. VSG control strategy of an isolated microgrid based on hybrid energy storage [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 33-40. (in Chinese)



王君瑞

作者简介：

王君瑞(1978—)，女，通信作者，博士，教授。研究方向：新能源发电技术，微网控制及电机控制技术。E-mail：jr09110111@163.com。

白冰超(1999—)，男，中国电源学会会员，硕士研究生。研究方向：新能源与电力电子技术。E-mail：baibingchao_1@126.com。

赵东琦(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：新能源与电力电子技术。E-mail：zdq0403@163.com。

乔煊景(1997—)，女，硕士研究生。研究方向：新能源与电力电子技术。E-mail：1354491134@qq.com。

朱旭强(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：新能源与电力电子技术。E-mail：13419705643@163.com。

豆帅(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：新能源与电力电子技术。E-mail：d476305310@163.com。

(责任编辑：郭凯凯)