

模拟直流电机调速特性的双向DC/DC变换器 虚拟直流电机控制策略

支娜, 明旭, 张林杰, 张辉, 张伟亮
(西安理工大学 电气工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要:传统虚拟直流电机VDCM(Virtual DC Machine)控制策略未考虑直流电机转速动态调节问题,不能够在直流母线电压变化瞬间起调节作用。对此,提出一种模拟直流电机闭环调速的储能侧双向DC/DC变换器新型VDCM控制策略。对直流电机与双向DC/DC变换器在数学模型和控制策略上进行联系等效与差异剖析,模拟直流电机定转子绕组间的电磁感应作用,将直流电机动态数学模型嵌入P-U下垂控制中,使其兼备电压动态调节能力和惯性阻尼特性。对采用新型VDCM控制策略前、后的作用效果进行对比,仿真和实验结果表明该控制策略能够在提升母线电压动态调节特性的同时,增强惯性调节和阻尼效果,在负载切换或分布式发电单元输出功率波动时维持直流微电网稳定运行。

关键词:直流微电网;双向DC/DC变换器;下垂控制;VDCM控制

中图分类号:TM 46

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202209015

0 引言

为实现我国能源转型,完成碳达峰、碳中和的远景目标,低压直流微电网作为新一代低碳高效的能源体系,受到广泛关注^[1-2]。直流微电网中,分布式能源、储能设备以及各种交直流负载均通过电力电子装置接入直流母线^[3],而电力电子装置均为非旋转静止元件,不具备传统电机的转动惯性和阻尼特性,因此直流微电网呈现低惯性特性^[4-5]。增加虚拟惯性调节,提升直流微电网的惯性特性,实现网内有功功率自主均衡^[6-7],是直流微电网可靠稳定运行的基础^[8-9]。

目前,虚拟惯性的研究主要应用于交流电网中逆变器控制,对直流微电网的相关研究较少,主要包括附加惯性控制^[10-11]、虚拟电容控制^[12-14]和虚拟直流电机VDCM(Virtual DC Machine)控制^[15-17]。文献^[10]提出了一种附加惯性控制策略,在原有的下垂控制中附加了惯性控制环节,模拟电容的工作原理来调度额外功率,并且引入高通滤波器代替微分环节,从而引入惯性特性;文献^[11]将文献^[10]中的高通滤波器替换成一阶惯性环节,避免高通滤波器带来的高频干扰。文献^[12]将交流电网中应用较为成

熟的虚拟同步电机VSG(Virtual Synchronous Generator)技术类比引入直流微电网中,通过控制双向并网变换器引入虚拟惯性,改善了直流母线电压动态性能;文献^[13]提出了一种用于直流微电网的自主虚拟电容控制策略,在传统双环控制之前加入下垂控制和虚拟电容控制,通过改变虚拟电容和虚拟阻抗降低电压变化率,解决直流微电网惯性低、稳定性差的问题;文献^[14]提出了一种协调电流共享算法的级联虚拟惯性控制,在双向DC/DC变换器和双向并网逆变器中引入统一的虚拟惯性控制。文献^[15]将直流电机数学模型和蓄电池侧双向DC/DC变换器进行等效类比,提出了一种VDCM控制策略,将直流电机的惯性特性和阻尼特性引入变换器中,提高了直流母线电压稳定性能;文献^[16]在传统电压电流双闭环控制中加入VDCM环节,为系统提供惯性支持;文献^[17]将交流侧和直流侧融合统一的虚拟电机控制,在并网运行时能够降低直流微电网内部功率波动对主电网的冲击。上述文献中,附加惯性控制需要在原有控制基础上增加惯性模型,控制结构较为复杂,不利于电力系统长时间运行;虚拟电容控制需要考虑电流输入和反馈带来的谐波以及超调问题,参数设计较为困难;VDCM控制将直流电机和双向DC/DC变换器进行等效类比,在控制策略中模拟直流电机运行特性,能够同时为直流微电网提供惯性和阻尼,因此本文选取VDCM为研究对象。

传统VDCM控制均为稳态模型,忽略了电枢电感对电枢电流的动态调节过程,而电力电子变换器在负载扰动、分布式电源功率波动时,直流母线电压的动态调节过程会直接影响直流微电网的稳定运

收稿日期:2022-02-26;修回日期:2022-07-01

在线出版日期:2022-09-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077176);国家自然科学基金面上项目(51877175);陕西省重点项目(2017ZDXM-GY-003)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52077176), the General Program of the National Natural Science Foundation of China(51877175) and the Major Program of Shaanxi Province(2017ZDXM-GY-003)

行。本文在 $P-U$ 下垂控制基础上,引入直流电机动态调速特性,得到一种新型 VDCM 控制策略。首先将直流电机和双向 DC / DC 变换器进行等效类比,从数学模型和控制策略两方面进行论述,并对 $P-U$ 下垂控制所缺特性进行剖析。其次依照直流电机定转子绕组间的电磁感应作用,模拟直流电机外环调速环节在 $P-U$ 下垂特性曲线中引入动态数学模型;模拟直流电机电流内环机械惯性特性将 $P-U$ 下垂控制中的电流环改进为惯性阻尼环节,由此得到新型 VDCM 控制策略。建立加入新型 VDCM 控制策略后的双向 DC / DC 变换器小信号模型,讨论参数变化对系统稳定性的影响规律。最后构建光储孤岛直流微电网仿真和实验平台,针对所提策略对于直流母线电压稳定性的提升作用进行验证。

1 直流电机与直流微电网的传统控制

1.1 直流电机的数学模型及其调速过程

直流电机的动态数学模型描述了各参数在电流过渡过程中的变化规律,是分析和计算电力拖动系统动态行为的基础。不同方向的电枢电流 i_a 分别代表直流电机工作在发电机模式或电动机模式,其指向电枢端时直流电机在电动机模式,其指向外端时直流电机工作在发电机模式。以直流电动机为例,其等效电路如图 1 所示。图中: R_a 、 L_a 分别为电枢绕组的电阻、电感; U_a 、 e_a 和 i_a 分别为机端电压、电枢电压和电流; v_f 、 i_f 分别为励磁电压与励磁电流; r_f 、 L_f 分别为励磁电阻与励磁电感; ω 为电机转动角速度; J 为转动惯量。

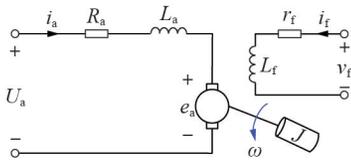


图1 直流电动机等效电路图

Fig.1 Equivalent circuit diagram of DC motor

直流电动机的动态数学模型为:

$$U_a = e_a + i_a (R_a + sL_a) \quad (1)$$

$$T_m - T_c = sJ\omega + B(\omega - \omega_0) \quad (2)$$

$$i_a - i_{L1} = (s\tau_m + C)e_a \quad (3)$$

$$e_a = C_e n \Phi \quad (4)$$

式中: T_c 和 T_m 分别为机械转矩和负载转矩; B 为阻尼系数; ω_0 为额定角速度; i_{L1} 为负载电流; C_e 为电势常数; n 为转速; Φ 为每极主磁通; τ_m 和 C 分别为机械时间常数和阻尼常数。

根据式(1)~(4)搭建直流电动机动态调速框图,见附录 A 图 A1。可看出直流电动机动态调速过程为:负载电流 i_{L1} 增大,转速 n 下降, e_a 下降, U_a 不变, U_a 和 e_a 差值增大, i_a 增大, n 回升。

1.2 双向 DC / DC 变换器的 $P-U$ 下垂控制

直流微电网中储能侧双向 DC / DC 变换器拓扑结构如图 2 所示。图中: u_b 、 i_b 分别为蓄电池电压及其输出电流; L_b 和 r_b 分别为蓄电池侧电感和电阻; S_1 和 S_2 为开关管; i_{out} 和 i_{dc} 分别为双向 DC / DC 变换器的前端和后端输出电流; C_b 为直流侧电容; i_{cap} 为电容电流; u_{dc} 为直流母线电压; e 为 S_1 在开关周期内的平均电压。

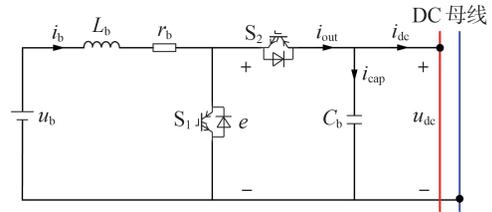


图2 双向 DC / DC 变换器拓扑图

Fig.2 Topology diagram of bidirectional DC / DC converter

不同方向的 i_b 分别代表双向 DC / DC 变换器工作在 Buck 和 Boost 的 2 种模式,其指向直流母线时双向 DC / DC 变换器工作在 Boost 模式,其指向储能侧时双向 DC / DC 变换器工作在 Buck 模式。以 Boost 模式为例, $P-U$ 下垂曲线表达式为:

$$u_{dc_ref} = U_N - P_o / R \quad (5)$$

式中: u_{dc_ref} 和 U_N 分别为直流母线电压参考值和额定值; $P_o = u_{dc} i_{dc}$ 为变换器输出功率; R 为虚拟电阻,式中以 $1/R$ 表示下垂曲线系数。

双向 DC / DC 变换器 $P-U$ 下垂控制框图如附录 A 图 A2 所示。具体调压过程为:直流侧负载功率增加时,蓄电池输出电流 i_b 增加,直流母线电压 u_{dc} 降低, u_{dc_ref} 不变, u_{dc_ref} 与 u_{dc} 偏差增加,重新增加蓄电池输出电流参考值 i_{b_ref} , u_{dc} 回升。

2 新型 VDCM 控制模型

2.1 直流电机与双向 DC / DC 变换器的等效类比

图 2 中双向 DC / DC 变换器的动态数学模型为:

$$u_b = e + i_b (r_b + sL_b) \quad (6)$$

$$i_{out} - i_{dc} = sC_b u_{dc} + G_b (u_{dc} - U_N) \quad (7)$$

式中: G_b 为直流侧电容导纳。

分别对比式(1)和式(6)、式(2)和式(7),可看出直流电机和双向 DC / DC 变换器的数学模型在组成形式上高度类似,两者等效电路图中的参数可分别进行类比等效,等效对照参数见附录 A 表 A1。再对比附录 A 图 A1、A2,可看出直流电机调速过程和储能变换器调压过程也具有高度类似性,因此两者在控制框图上也可进行等效类比。由此将直流电机与双向 DC / DC 变换器等效联系。

对于直流电动机动态调速过程, i_{L1} 变化会导致 n 偏离额定值, e_a 随之变化,微分项 sL_a 在 e_a 变化瞬间快速

作用于误差变化率,因此直流电机外环下垂控制可起到快速动态调节作用。内环控制为直流电机惯性阻尼调节, τ_m 决定直流电机响应速度,并提供足够惯量防止 n 突变, C 提供足够阻尼,对 n 的变化起阻碍作用,因此电流内环所提供的惯量在转速改变瞬间维持原运动状态不变,同时阻尼特性能够提升直流电机的抗扰性能。

而双向 DC / DC 变换器 P - U 下垂控制实质上由功率环(P - U 下垂曲线)、电压环(比例积分 PI (Proportional Integral) 控制)和电流环(PI 控制)组成,并不具备直流电机动态调速过程中的外环动态调节和内环惯性阻尼调节,导致直流微电网应对负载功率突变时的调节能力较差。为使双向 DC / DC 变换器具有与直流电机类似的调节特性,将直流电机的动态下垂调节以及电流内环惯性阻尼调节思想引入双向 DC / DC 变换器控制中,能够提升直流微电网中电力电子变换器的动态特性以及惯性阻尼特性,提高直流微电网的运行稳定性。

2.2 VDCM 控制策略

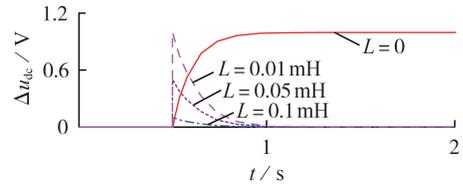
首先,模拟式(1)及直流电机外环转速动态下垂调节过程,在 P - U 下垂控制中引入微分环节,使其能够在负载动态变化瞬间减小误差变化率,调整直流母线电压突变瞬间超调量,在不影响稳定性的前提下提前修正输出信号,增加阻尼,提升响应速度^[18-19]。由于负载稳态运行时微分作用失效,改进后的 P - U 下垂控制方程为:

$$u_{dc_ref} = U_N - \frac{1}{R+sL} P_o \quad (8)$$

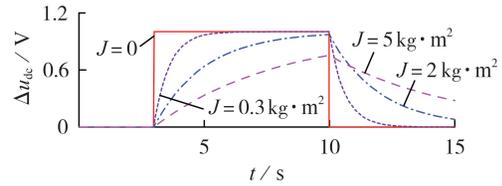
式中: L 为虚拟电感,表示微分系数。

对式(8)中的微分环节 sL 进行分析,绘制其阶跃惯性响应性曲线,如图 3(a)所示。由图可知:令未加入微分作用前($L=0$)的直流母线电压变化量 Δu_{dc} 输出为阶跃惯性响应曲线, $L=0.01$ mH 时,对阶跃惯性上升过程中的变化量逐步进行微分计算,此时 Δu_{dc} 超调尖峰值为 1 V; $L=0.05$ mH 时, Δu_{dc} 超调尖峰值为 0.5 V; $L=0.1$ mH 时, Δu_{dc} 超调尖峰值为 0.1 V,可见微分系数 L 越大,阶跃惯性响应经过微分环节后输出的 Δu_{dc} 超调尖峰值越小。因此,在双向 DC / DC 变换器 P - U 下垂控制中引入动态微分环节,在保证稳定性的同时也能够降低直流母线电压变化时的超调量,增强直流微电网动态调节效果。

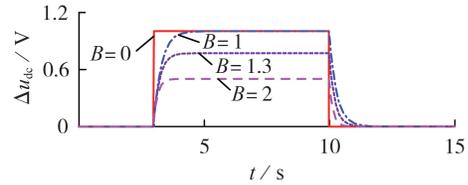
其次,直流微电网中直流侧电容 C_b 能够对直流母线电压变化起到缓冲抑制作用,但相比直流电机中的转动惯量 J 和阻尼系数 B 而言,其值较小并不足以直流微电网提供足够惯性支撑^[20]。在双向 DC / DC 变换器的 P - U 下垂控制中,电流内环表达式为:



(a) 不同微分系数 L 的电压阶跃响应



(b) 不同惯性系数 J 的电压阶跃响应



(c) 不同阻尼系数 B 的电压阶跃响应

图 3 控制参数变化时 Δu_{dc} 响应波形图

Fig.3 Response waveform diagram of Δu_{dc} when control parameters change

$$\Delta u = (i_{b_ref} - i_b) \left(k_{pi} + \frac{k_{ii}}{s} \right) \quad (9)$$

式中: k_{pi} 、 k_{ii} 分别为电流环比例、积分系数; Δu 为脉冲宽度调制 PWM (Pulse Width Modulation) 波的输入信号。

直流电机中电流内环表达式可由式(3)变形为:

$$e_a = (i_a - i_L) / (s\tau_m + C) \quad (10)$$

式(9)和式(10)同样作为电流内环表达式,对比可知式(9)不具备式(10)中的惯性阻尼调节。为了模拟直流电机电流内环惯性阻尼调节过程,在 P - U 下垂控制的电流内环中引入惯性环节,改进后表达式为:

$$\Delta u = (i_{b_ref} - i_b) / (B + sJ) \quad (11)$$

与传统的惯性环节引入方式不同,本文直接将电流的 PI 控制器改进为惯性环节调节器,理论上功率环可控制输出功率的大小,在电压稳定时(电压环 PI 控制),可保证输出电流的稳定,惯性环节的引入为双向 DC / DC 变换器提供额外惯性与阻尼,增强直流微电网运行稳定性。由式(11)得到新型 VDCM 控制策略中电流内环控制器传递函数 $G_i(s)$ 为:

$$G_i(s) = \frac{1}{sJ + B} \quad (12)$$

由式(12)绘制参数 J 、 B 的响应特性。图 3(b)中:令转动惯量 $J=0$,此时 Δu_{dc} 输出为阶跃脉冲曲线; $J=0.3$ kg·m² 时, Δu_{dc} 在阶跃脉冲上升沿到来时刻缓慢上升,逐渐达到稳态值; $J=2$ kg·m² 时, Δu_{dc} 在阶跃脉冲上升沿到来时上升更加缓慢; $J=5$ kg·m² 时可明

显看出曲线还未上升到最高点,就随着阶跃信号下降沿时刻的到来被迫缓慢下降,由此可见,转动惯量 J 越大,阶跃信号上升越缓慢,选取合适转动惯量值,能够同时保证输出曲线上升/下降的速度以及输出曲线的平滑度。

图3(c)中: $B=0$ 时,无阻尼作用; $B=1$ 时,阻尼作用微弱; $B=1.3$ 时, Δu_{dc} 最高稳态值为 0.78 V ; $B=2$ 时, Δu_{dc} 最高稳态值为 0.5 V ,阻尼作用更强。由此可见,随着阻尼系数 B 的增加,阶跃响应的上升/下降速度无明显变化,上升后到达稳态的幅值更低,因此判断 B 仅对稳态值存在影响,选取合适的阻尼系数值能更好地抑制输出曲线的稳态波动。

综上,由理论分析可知:本文所提新型VDCM控制策略模拟直流电机调速过程中的动态下垂调节特性,能够减小直流母线电压突变时的超调量且保证快速性;模拟直流电机电流内环惯性阻尼调节过程,为直流微电网提供额外惯性与阻尼,增强直流微电网运行的稳定性。最终得到的模拟直流电机调速过程的双向DC/DC变换器控制框图如图4所示。

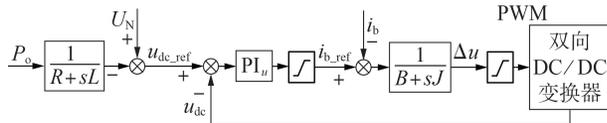


图4 新型VDCM控制框图

Fig.4 Block diagram of novel VDCM control

3 小信号稳定性分析

为分析改进VDCM控制策略对变换器性能的影响,建立附录A图A3所示双向DC/DC变换器小信号等效电路。据图A3及理论推导得出各环节传递函数表达式, Δd 到 Δi_b 传递函数 $G_{id}(s)$ 、 Δd 到 Δu_{dc} 传递函数 $G_{ud}(s)$ 、电压环传递函数 $G_{plu}(s)$ 、调制器传递函数 $G_m(s)$ 的表达式分别为:

$$G_{id}(s) = \frac{\Delta i_b}{\Delta d} = -\frac{di_b + sC_b u_{dc}}{s^2 C_b L_b + sC_b r_b + d^2} \quad (13)$$

$$G_{ud}(s) = \frac{\Delta u_{dc}}{\Delta d} = \frac{(r_b + sL_b)i_b - du_{dc}}{s^2 C_b L_b + sC_b r_b + d^2} \quad (14)$$

$$G_{plu}(s) = \frac{sk_{pu} + k_{iu}}{s} \quad (15)$$

$$G_m(s) = \frac{1}{V_m} \quad (16)$$

式中: k_{pu} 、 k_{iu} 分别为电压外环比例、积分系数; V_m 为载波峰值; Δu_{dc} 为直流母线电压小扰动; Δi_b 为蓄电池电流小扰动; Δd 为占空比 d 小扰动。

结合VDCM控制框图和双向DC/DC变换器小信号等效电路,得到附录A图A4所示VDCM小信号模型,其直流电压与变换器输出功率之间的开环传递函数 $G_{up}(s)$ 为:

$$G_{up}(s) = \frac{\Delta u_{dc}}{\Delta p_o} = \frac{G_{xc}(s)G_{plu}(s)G_i(s)G_m(s)G_{ud}(s)}{1 + G_i(s)G_m(s)G_{id}(s) + G_i(s)G_m(s)G_{plu}(s)G_{ud}(s)} \quad (17)$$

阻感特性下垂控制传递函数 $G_{xc}(s)$ 为:

$$G_{xc}(s) = \frac{1}{sL + R} \quad (18)$$

将各传递函数表达式代入式(17)并移项可得:

$$\Delta u_{dc} = (sk_{pu} + k_{iu}) \left[(r_b + sL_b)i_b - du_{dc} \right] \Delta p_o / \left\{ (sL + R) \times \left[s(sJ + B)(s^2 C_b L_b + sC_b r_b + d^2) - s(di_b + sC_b + u_{dc}) + (sk_{pu} + k_{iu}) \left[(r_b + sL_b)i_b - du_{dc} \right] \right] \right\} \quad (19)$$

移项后的 L 、 J 、 B 都在分母中,以微分系数 L 变化为例:直流微电网中功率调节 Δp_o 一定时,增大 L 会减小直流母线电压变化量 Δu_{dc} ,即 L 增大可抑制直流母线电压波动, J 和 B 分析同理。由 $G_{up}(s)$ 绘制开环传递函数Nyquist曲线图和Bode图,进一步探讨 L 、 J 、 B 这三个参数变化对系统稳定性的影响。采用附录A表A2所示参数值,仿真结果如附录A图A5所示,定量分析如附录A表A3所示。

由图A5可知: J 增加,Nyquist曲线逐渐远离点 $(-1, 0)$,这说明系统稳定裕度随着 J 的增大而增大;由Bode图可知, J 从 $0.001\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 增加到 $0.1\text{ kg}\cdot\text{m}^2$,幅值裕度由 77.1 dB 增加到 83.6 dB ,穿越频率由 1150 rad/s 减小至 479 rad/s 。可见随着幅值裕度的增加,系统稳定性改善,但增加程度有限,因此增大 J 对稳定性提升有限;同时穿越频率减小,快速性变差。综上选取 $J=0.01\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

$B=10$ 时,Nyquist曲线远离点 $(-1, 0)$ 距离跨度较为明显。Bode图中阻尼系数 B 从1增加到50,幅值裕度由 75.2 dB 增加到 101 dB ,穿越频率由 640 rad/s 增加到 1720 rad/s 。可见幅值裕度增加,一定程度上增加阻尼效果,穿越频率增加,快速性变好,因此 B 在一定范围内增加可抑制扰动对系统稳定性的影响。综上选取 $B=10$ 。

L 增大时,Nyquist曲线逐渐远离点 $(-1, 0)$,说明 L 增大系统稳定性增强, $L=7\text{ mH}$ 和 $L=10\text{ mH}$ 时的Nyquist曲线跨度较小。Bode图中 L 从 1 mH 增加到 10 mH ,开环传递函数幅值裕度从 66.5 dB 增加到 82.9 dB ,系统稳定性增强;穿越频率从 955 rad/s 减小至 778 rad/s ,减小幅度有限,对快速性影响微弱。综上选取 $L=7\text{ mH}$ 。

综上, J 、 B 、 L 选取合适数值时,能够使VDCM控制策略具有较好的幅值裕量和穿越频率,有效提升直流微电网稳定性及快速性。

4 仿真分析与实验验证

在 MATLAB / Simulink 中构建附录 A 图 A6 所示孤岛模式下直流微电网仿真模型,其中光伏模块采用最大功率点跟踪控制,储能单元分别采用 $P-U$ 下垂控制和所提新型 VDCM 控制,仿真参数见附录 A 表 A2。

4.1 改进前、后仿真对比

工况 1: 光伏输出功率恒定为 5 kW, 图 5(a) 为负载功率 p_{load} 波动时 u_{dc} 输出波形图。0.8 s 时负载功率从 4 670 W 减小至 2 140 W, 可看出负载功率突降瞬间, 相比 $P-U$ 下垂控制, 采用改进 VDCM 控制 u_{dc} 上升超调量减小 8.1 V, 且恢复至稳态后减小 0.6 V; 1.2 s 时负载功率由 2 140 W 增大至 5 610 W, 突升瞬间采用改进 VDCM 控制的 u_{dc} 下降超调量减小 9 V, 且恢复至稳态后减小 0.2 V, 更趋于额定值。同时, 由图 5(b) 可看出, 负载功率波动时, 所提 VDCM 控制下 i_{dc} 能够更快上升 / 下降至所需值。

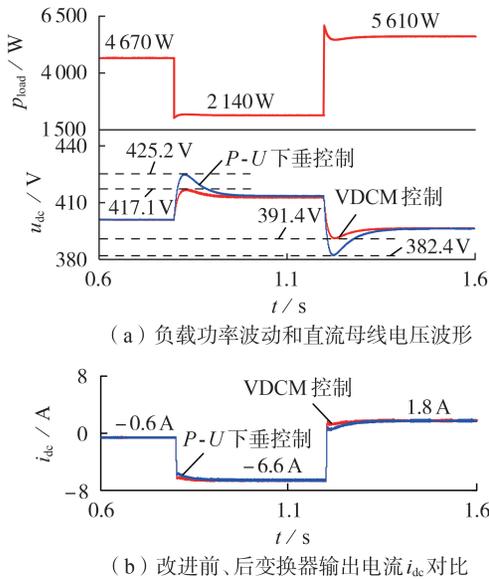


图 5 负载功率波动时仿真波形

Fig.5 Simulative waveforms of load power fluctuation

工况 2: 设置负载功率恒定, 图 6 为光伏功率 p_{pv} 波动时的仿真波形图。0.8 s 时光伏功率从 5 000 W 升高至 6 550 W, 由图 6(a) 可看出光伏功率突升瞬间, 改进前 u_{dc} 上升超调量减小 4.1 V, 恢复至稳态后的误差减小 0.5 V; 1.2 s 时光伏功率由 6 550 W 减小至 2 350 W, 突降瞬间改进 VDCM 控制下的 u_{dc} 超调量相比减小 10.3 V, 恢复至稳态后的误差减小 0.6 V, 更趋于额定值。图 6(b) 中, 光伏功率波动时, 所提 VDCM 控制下 i_{dc} 能够更快上升 / 下降至所需值。

4.2 实验验证

为进一步验证所提 VDCM 控制策略有效性, 搭建附录 A 图 A7 所示的直流微电网实验平台, 参数见

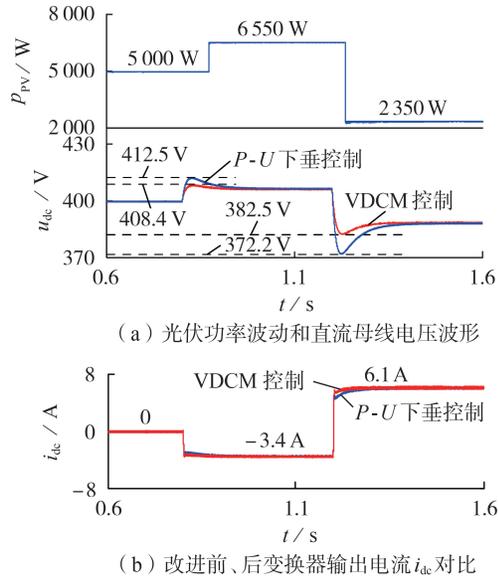


图 6 光伏功率波动时仿真波形

Fig.6 Simulative waveforms of PV power fluctuation

附录 A 表 A2, 模拟了负载波动和光伏波动 2 种工况。

图 7(a)、(b) 分别为负载功率波动时采用 $P-U$ 下垂控制和新型 VDCM 控制得到的实验波形。令光伏输出电流 i_{pv} 恒定为 12 A, 负载功率突增瞬间, 改进前、后 u_{dc} 分别跌落 8.8 V 和 6.3 V, 改进后跌落幅值更小; 恢复至稳态后 u_{dc} 分别为 394.7 V 和 395.0 V, 改进后更接近额定值; 蓄电池输出电流 i_b 由 1.2 A 升高至 9.6 A, 改进后为直流侧提供更多能量。

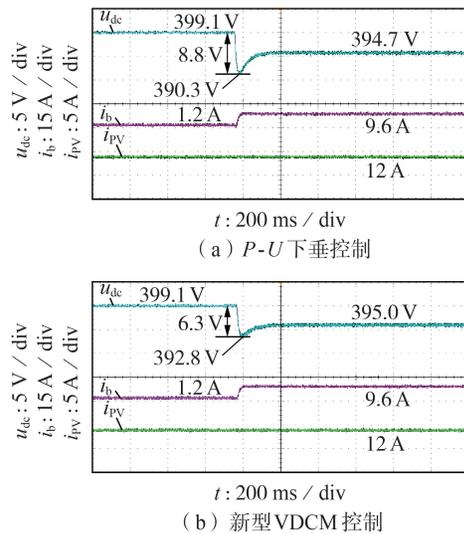


图 7 负载功率波动下实验波形

Fig.7 Experimental waveforms under load power fluctuation

图 8(a)、(b) 分别为光伏输出电流波动时采用 $P-U$ 下垂控制和 VDCM 控制得到的实验波形。维持负载功率恒定, 光伏输出电流 i_{pv} 由 7.1 A 升高至 11 A, 改进前、后 u_{dc} 分别上升 6.9 V 和 5.1 V, 改进后上升幅值减小; 恢复至稳态后 u_{dc} 分别为 392.3 V 和

392.5 V,改进后更接近额定值;蓄电池输出电流 i_b 由23.7 A减小至12.1 A,改进后向直流侧提供的能量减少。

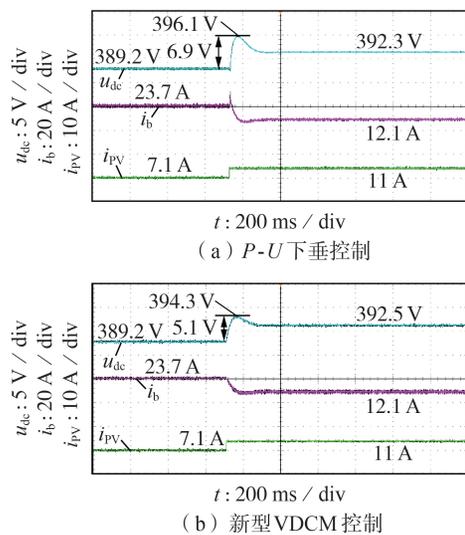


图8 光伏功率波动下实验波形

Fig.8 Experimental waveforms under PV power fluctuation

综上所述,所提VDCM控制策略相比 $P-U$ 下垂控制能够在负载功率和光伏输出电流波动瞬间降低 u_{dc} 超调量,能够快速达到稳态并减小稳态误差,增强直流微电网的动态调节和惯性阻尼特性。

5 结论

本文针对传统VDCM控制策略未考虑直流电机转速动态调节问题,模拟了直流电机定转子绕组间的电磁感应作用,提出了一种应用于储能侧双向DC/DC变换器的新型VDCM控制策略。所提策略可主动为低惯性的电力电子变换器引入惯量和阻尼以提高惯性和阻尼特性,相比已有的VDCM控制策略结构更为简单。同时,能够增强直流微电网的动态调节能力,减小直流侧功率变化时的电压超调量,有效提升直流微电网运行稳定性,仿真和实验结果验证了所提策略的有效性和优越性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 贺隹,李勇,曹一家,等.考虑分布式储能参与的直流配电网电压柔性控制策略[J].电工技术学报,2017,32(10):101-110.
HE Li, LI Yong, CAO Yijia, et al. Flexible voltage control strategy of DC distribution network considering distributed energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 101-110.
- [2] 谢文强,韩民晓,严稳利,等.考虑恒功率负荷特性的直流微电网分级稳定控制策略[J].电工技术学报,2019,34(16):3430-3443.
XIE Wenqiang, HAN Minxiao, YAN Wenli, et al. Hierarchical stability control strategy of DC microgrid considering constant
- [3] 文云峰,杨伟峰,林晓煌.低惯量电力系统频率稳定分析与控制研究综述及展望[J].电力自动化设备,2020,40(9):211-222.
WEN Yunfeng, YANG Weifeng, LIN Xiaohuang. Review and prospect of frequency stability analysis and control of low-inertia power systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 211-222.
- [4] 薛安成,付潇宇,乔登科,等.风电参与的电力系统次同步振荡机理研究综述和展望[J].电力自动化设备,2020,40(9):118-128.
XUE Ancheng, FU Xiaoyu, QIAO Dengke, et al. Review and prospect of research on sub-synchronous oscillation mechanism for power system with wind power participation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 118-128.
- [5] 林刚,李勇,王资雅,等.低电压直流配电系统谐振机理分析与有源抑制方法[J].电网技术,2017,41(10):3358-3364.
LIN Gang, LI Yong, WANG Ziya, et al. Resonance mechanism analysis and its active damping suppression of LVDC distribution system[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3358-3364.
- [6] 刘英培,周素文,梁海平,等.光储直流配电网灵活虚拟惯性控制策略[J].电力自动化设备,2021,41(5):107-113.
LIU Yingpei, ZHOU Suwen, LIANG Haiping, et al. Flexible virtual inertial control strategy of photovoltaic-energy storage DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 107-113.
- [7] 付媛,邵馨玉,赵欣艳,等.基于附加电量的直流微电网动态稳定控制策略[J].电力自动化设备,2021,41(5):136-144,159.
FU Yuan, SHAO Xinyu, ZHAO Xinyan, et al. Dynamic stability control strategy of DC microgrid based on additional electric quantity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 136-144, 159.
- [8] 张勇军,刘子文,宋伟伟,等.直流配电系统的组网技术及其应用[J].电力系统自动化,2019,43(23):39-49.
ZHANG Yongjun, LIU Ziwen, SONG Weiwei, et al. Networking technology and its application of DC distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 39-49.
- [9] 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):84-97.
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): 84-97.
- [10] 朱晓荣,蔡杰,王毅,等.风储直流微网虚拟惯性控制技术[J].中国电机工程学报,2016,36(1):49-58.
ZHU Xiaorong, CAI Jie, WANG Yi, et al. Virtual inertia control of wind-battery-based DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 49-58.
- [11] 朱晓荣,谢志云,荆树志.直流微电网虚拟惯性控制及其稳定性分析[J].电网技术,2017,41(12):3884-3893.
ZHU Xiaorong, XIE Zhiyun, JING Shuzhi. Virtual inertia control and stability analysis of DC microgrid[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 3884-3893.
- [12] WU Wenhua, CHEN Yandong, LUO An, et al. A virtual inertia control strategy for DC microgrids analogized with virtual synchronous machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7): 6005-6016.
- [13] UNAMUNO E, BARRENA J A. Design and small-signal stability analysis of a virtual-capacitor control for DC microgrids

- [C]//European Conference on Power Electronics and Applications. Warsaw, Poland: IEEE, 2017: 1-10.
- [14] SAMANTA S, MISHRA J P, ROY B K. Implementation of a virtual inertia control for inertia enhancement of a DC microgrid under both grid connected and isolated operation[J]. Computers & Electrical Engineering, 2019, 76: 283-298.
- [15] SAMANTA S, MISHRA J P, ROY B K. 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.
- [16] 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.
- [17] 兰征, 涂春鸣, 姜飞. 基于虚拟电机技术的直流微电网与主电网柔性互联策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(8): 1739-1749.
LAN Zheng, TU Chunming, JIANG Fei. The flexible interconnection strategy between DC microgrid and AC grid based on virtual electric machinery technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(8): 1739-1749.
- [18] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 5版. 北京: 科学出版社, 2007: 120-134.
- [19] 徐海珍, 张兴, 刘芳, 等. 基于微分补偿环节虚拟惯性的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 96-102.
XU Haizhen, ZHANG Xing, LIU Fang, et al. Control strategy of virtual synchronous generator based on differential compensation virtual inertia[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 96-102.
- [20] 刘英培, 周素文, 梁海平, 等. 光储直流配电网灵活虚拟惯性控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(5): 107-113.
LIU Yingpei, ZHOU Suwen, LIANG Haiping, et al. Flexible virtual inertial control strategy of photovoltaic-energy storage DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 107-113.

作者简介:



支 娜

支 娜(1976—),女,副教授,博士,主要研究方向为新能源发电及微电网控制 (E-mail: zhina@xaut.edu.cn);

明 旭(1998—),女,硕士研究生,主要研究方向为直流微电网及其协调控制 (E-mail: mingxu_xaut@outlook.com)。

(编辑 王欣竹)

Virtual DC machine control strategy for bidirectional DC / DC converter simulating speed regulation characteristics of DC machine

ZHI Na, MING Xu, ZHANG Linjie, ZHANG Hui, ZHANG Weiliang

(School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The traditional VDCM (Virtual DC Machine) control strategy does not consider the dynamic adjustment of the DC machine speed, and cannot adjust at the instant of DC bus voltage change. In view of this, a novel VDCM control strategy of the energy storage side bidirectional DC / DC converter that simulates the closed-loop speed regulation of the DC machine is proposed. The mathematical model and control strategy of the DC machine and the bidirectional DC / DC converter are analyzed, and the electromagnetic induction function between the stator and rotor windings of DC machine is simulated. The dynamic mathematical model of the DC machine is embedded in the $P-U$ droop control, so that it has the ability of voltage dynamic regulation and inertia damping characteristics. Comparing with the effects before and after adopting the novel VDCM control strategy, the simulative and experimental results show that the control strategy can not only improve the dynamic regulation characteristics of bus voltage, but also enhance the inertia regulation and damping effect, and maintain the stable operation of DC microgrid when the load is switched or the output power of distributed generation unit fluctuates.

Key words: DC microgrid; bidirectional DC / DC converter; droop control; VDCM control

附录 A

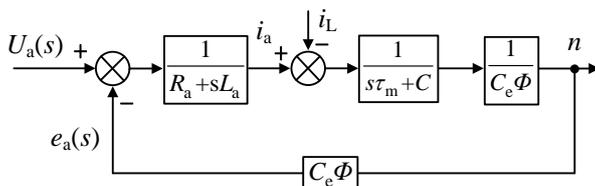


图 A1 直流电动机动态调速控制框图
Fig. A1 DC motor control block diagram

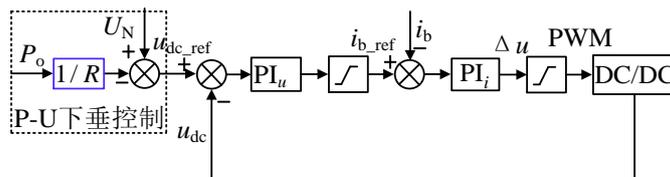


图 A2 P-U 下垂控制框图
Fig. A2 Traditional droop control block diagram

表 A1 直流电机与双向 DC/DC 变换器参数对应关系

Table A1 Corresponding relationship of DC motor and bidirectional DC/DC converter parameters

直流电机参数	双向DC/DC变换器参数	直流电机控制参数	双向DC/DC变换器参数
U_a	u_b	T_m	i_{out}
e_e	e	T_e	i_{dc}
R_a	r_b	J	C_b
L_a	L_b	ω	u_{dc}
i_a	i_b	B	G_b

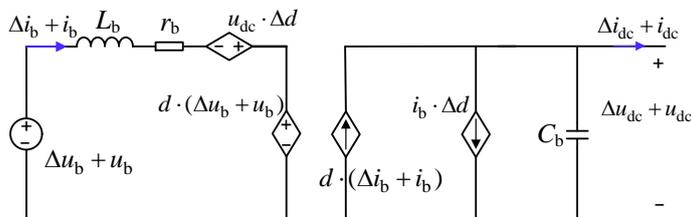


图 A3 双向 DC/DC 变换器小信号等效电路
Fig. A3 Equivalent circuit of bidirectional DC/DC converter small signal

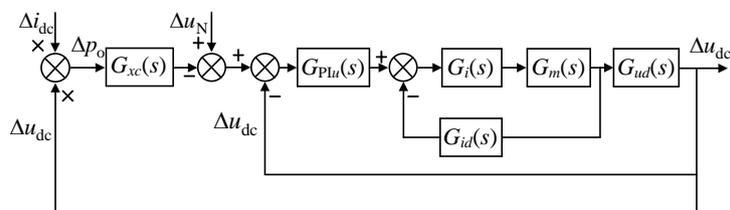
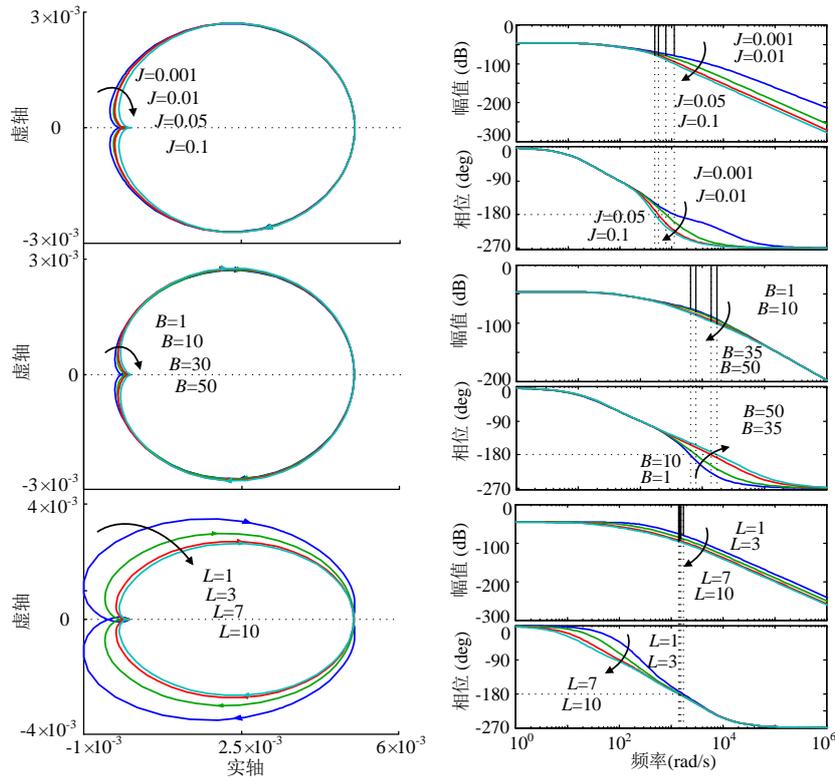


图 A4 VDCM 小信号模型
Fig. A4 VDCM small signal model

表 A2 直流微电网仿真参数
Table A2 DC microgrid simulation parameters

参数	参数值	参数	参数值
直流母线电压额定值 U_N/V	400	光伏输出电压 U_{pv}/V	235
蓄电池端电压 U_b/V	96	光伏输出电流 I_{pv}/A	21.25
开关频率 f_s/kHz	20	储能装置初始 SOC/%	60
蓄电池侧电感 L_b/mH	4	蓄电池侧电阻 r_b/Ω	0.01
直流侧电容 $C_b/\mu F$	300e-5	转动惯量 $J/kg\ m^2$	0.01
电压环控制器 k_{pu} 、 k_{iu}	1.4、30	阻尼系数 B	10
微分系数 L	7	虚拟阻抗 R	200



(a) 不同参数变化时的 Nyquist 曲线图 (b) 不同参数变化时的 bode 图

图 A5 不同参数变化时的 Nyquist 曲线图和 Bode 图

Fig. A5 Nyquist graphs and Bode graphs with different parameters

表 A3 不同参数 Bode 图的定量分析
Table A3 Quantitative analysis of Bode graphs with different parameters

参数	待分析量	参数值			
转动惯量 $J/(kg\ m^2)$	取值	0.001	0.01	0.05	0.1
	幅值裕度/dB	77.1	77.8	80	83.6
	穿越频率 $\omega_g/(rad\ s^{-1})$	1.15e3	788	560	479
阻尼系数 B	取值	1	10	35	50
	幅值裕度/dB	75.2	80	94.9	101
	穿越频率 $\omega_g/(rad\ s^{-1})$	640	788	1.38e3	1.72e3
微分系数 L	取值	1	3	7	10
	幅值裕度/dB	66.5	73.5	80	82.9
	穿越频率 $\omega_g/(rad\ s^{-1})$	955	827	788	778

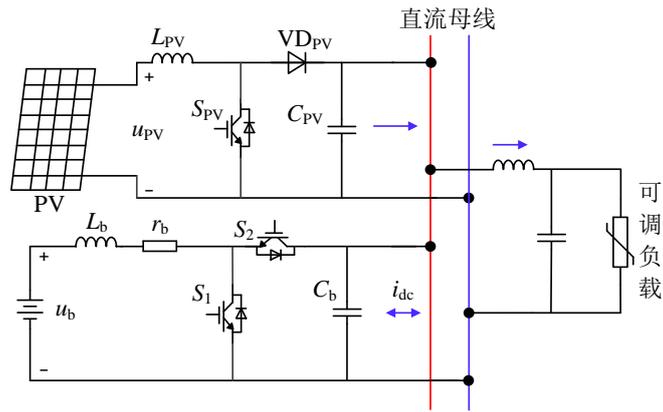


图 A6 孤岛模式下直流微电网仿真模型
 Fig. A6 Simulation model of DC microgrid in island mode



图 A7 系统实验平台
 Fig. A7 Experimental platform of system