

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210815

直流微网双向 DC/DC 变换器虚拟惯量和阻尼系数 自适应控制策略

曾国辉¹, 廖鸿飞¹, 赵晋斌², 朱相臣¹

(1. 上海工程技术大学, 上海 201600; 2. 上海电力大学, 上海 200082)

摘要: 在高新能源渗透率下的直流微网系统中, 电力电子器件比例不断提高, 导致系统存在低惯性问题, 降低系统运行稳定性。为此提出了一种改进的虚拟惯量和阻尼系数自适应控制策略。该方法通过类比交流系统逆变器的虚拟直流发电机控制, 分析直流微网系统在虚拟惯量和阻尼系数控制下负荷扰动量与输出电压扰动量的关系特性, 将自适应控制策略引入虚拟惯量和阻尼系数。通过建立小信号模型, 利用系统输出阻抗结合阻抗比判据给出虚拟惯量和阻尼系数的变化范围和边界, 分析虚拟惯量和阻尼系数自适应选取下系统惯性变化及母线电压响应效果, 该方法提高了直流微网系统惯性, 同时改善了直流母线的动态响应。最后通过 Matlab/Simulink 仿真和 RT-LAB 半实物实验, 验证了所提控制策略的有效性。

关键词: 直流微网; 虚拟惯量; 阻尼系数; 自适应控制策略

A self-adaptive control strategy of virtual inertia and a damping coefficient for bidirectional DC-DC converters in a DC microgrid

ZENG Guohui¹, LIAO Hongfei¹, ZHAO Jinbin², ZHU Xiangchen¹

(1. Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600, China; 2. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200082, China)

Abstract: In a DC microgrid system with high penetration of new energy, the proportion of power electronic devices continues to increase. This leads to the problem of low inertia in the system and reduces the stability of the system. Therefore, an improved adaptive control strategy of virtual inertia and a damping coefficient is proposed. This method analyzes the relationship between load disturbance and output voltage disturbance in the DC microgrid system under the control of virtual inertia and damping coefficient by analogy to the virtual DC generator control of the inverter of the AC system, and introduces an adaptive control strategy into virtual inertia and the damping coefficient. By establishing a small signal model, using the system output impedance combined with the impedance ratio criterion, the range and boundary of the virtual inertia and damping coefficient are given, and the effect of system inertia change and bus voltage response under the adaptive selection of virtual inertia and damping coefficient is analyzed. The strategy increases the inertia of the DC microgrid system and improves the dynamic response of the DC bus. Finally, Matlab/Simulink simulation and RT-LAB hardware in a loop experiment verify the effectiveness of the proposed control strategy.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177184).

Key words: DC microgrid; virtual inertia; damping coefficient; adaptive control strategy

0 引言

化石能源短缺以及环境恶化等问题, 促进了以可再生能源为主的分布式发电新型电力技术的飞速

发展^[1-2]。由分布式电源和负荷构建的直流微网不仅能满足局部用户用电质量和安全需求, 还能减少分布式电源渗透对电力系统的影响^[3]。

由于大量电力电子变换器的接入, 直流微网呈低惯性状态, 新能源的间歇性和负荷的波动性都会导致直流母线电压产生较大波动, 严重影响电

能质量^[4]。

直流微网中储能单元对于稳定直流微网母线电压有重要作用,通过改进其变换器的控制策略可以提升稳定性。为此,国内外专家提出一些改进方法来增强直流微网惯性,包括变下垂系数^[5-8]、附加虚拟惯性控制^[9-13]、虚拟直流电机控制^[14-15]和类比虚拟发电机控制^[16-18]。文献[8]提出了一种自适应虚拟阻抗控制策略,通过调整负载输入阻抗来提高系统稳定性。文献[9]运用虚拟电容以改善系统瞬态响应的仿真。但是变下垂系数和附加虚拟惯性控制在扰动初期仍会产生一定程度的电压波动,文献[16]为了解决恒功率负载引起的稳定性问题,在虚拟电容的基础上引入主动阻尼回路,增加了阻尼,提高了系统的稳定性;并且添加前馈控制来抑制电压初期波动,修正动态特性。但是其惯性控制参数和阻尼控制参数均为恒定值,难以平衡系统的抗干扰和动态响应能力。文献[18]通过与虚拟发电机的特性类比来进行惯性控制,但是其惯性控制参数和阻尼控制参数与文献[16]一样均为恒定值,难以达到预期稳定性控制效果。

针对直流微网的惯性优化控制,国内外学者转向研究自适应参数设计,并证明了设计自适应参数能有效改善系统响应。文献[17,19]设置了灵活的惯性参数控制,但是未考虑通过增加系统的阻尼系数改善动态响应能力。文献[20]不仅考虑了虚拟惯量的自适应还考虑了虚拟阻尼系数的自适应性,但是在考虑虚拟阻尼系数的自适应性时,未考虑电压波动量大小对阻尼系数的影响,因此在考虑虚拟惯量和虚拟阻尼系数自适应时,还可以加入电压波动量大小的影响。文献[21]则同时考虑了电压波动率以及电压波动量的大小,但是其应用对象为 DC/AC 逆变器,用于抑制角频率的动态响应。

本文以储能单元接入直流微网的双向 DC/DC 变换器为研究对象,类比于含虚拟同步发电机(Analogous Virtual Synchronous Generators, AVSG)的 DC/AC 逆变器,引入 AVSG 控制,并通过输出特性分析,提出虚拟惯量和阻尼系数自适应控制策略,进一步改善系统动态稳定性。然后建立该控制策略的小信号模型,通过阻抗比判据^[22-23]验证其所提策略模型的稳定性支撑效果。最后针对本文提出的直流微网双向 DC/DC 变换器虚拟惯量和阻尼系数的自适应控制策略,利用 Matlab/Simulink 仿真和 RT-LAB 半实物实验,验证其有效性和理论分析的正确性。

1 直流微网结构及 AVSG 控制

1.1 直流微网结构及控制策略

图 1 为本文所研究的直流微网的拓扑结构,由光伏、储能单元、负载以及相应的电力电子变换器构成,光伏通过单向升压变换器接入直流母线,其变换器采用最大功率点跟踪来充分利用新能源。直流负荷和交流负荷通过单向降压变换器与直流母线连接。储能单元通过双向 DC/DC 变换器接入直流微网,该变换器等效电路图如图 2 所示。图中 L 为滤波电感; R 为等效电阻; C_b 为稳压电容; u_b 、 i_b 分别为储能单元电压和输出电流; u_0 为直流母线电压; i_0 为变换器输出电流。其变换器采用自适应虚拟惯量和阻尼系数控制,以实现灵活快速惯性响应,改善电压响应特性,同时实现动态调节性能。

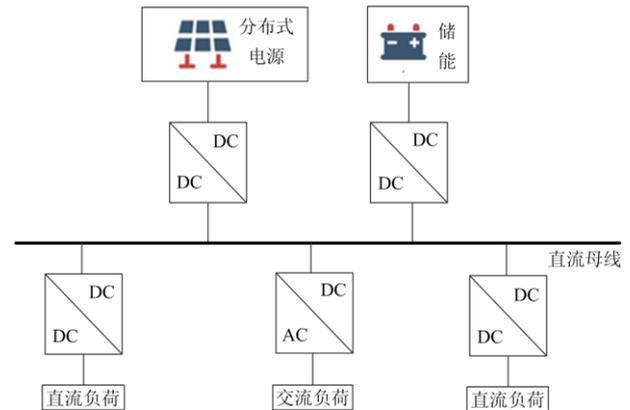


图 1 直流微网拓扑结构

Fig. 1 Topology of DC microgrid

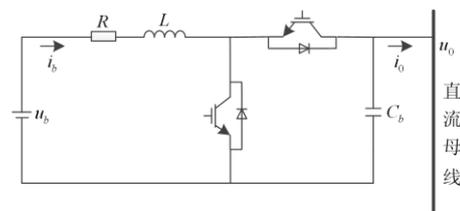


图 2 双向 DC-DC 变换器等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of bidirectional DC-DC converter

1.2 AVSG 控制原理

在 DC/AC 逆变器中 AVSG 的有功-频率控制通过模拟同步发电机的控制来提高交流微网系统的惯性,具体表达式为

$$P_{\text{set}} - P_0 - D(\omega_0 - \omega_n) \approx J \frac{d\omega_0}{dt} \quad (1)$$

式中: P_{set} 、 P_0 分别为设定的有功功率和输出功率; ω_0 、 ω_n 分别为角频率和额定角频率; D 为阻尼系

数; J 为虚拟惯量。

由式(1)可知, DC/AC 逆变器 AVSG 控制通过惯量 J 模拟释放能量来防止频率突变, 以此来提高系统的惯性。其释放的能量储存在虚拟发电机转子中, 转子能量 W_v 的表达式为

$$W_v = \frac{1}{2} J \omega_0^2 \quad (2)$$

类比至本文所应用的直流微网的直流双向 DC/DC 变换器, 可以通过模拟注入电流的方式抑制电压突变以实现惯性支撑。类比于式(2), 在直流 DC/DC 变换器中可以通过并联虚拟电容来存储所需能量^[8]。

$$W_c = \frac{1}{2} C_v u_0^2 \quad (3)$$

式中: C_v 为直流微网侧并联虚拟电容; W_c 为电容储存的能量。由上述特性和公式类比可知, 含 AVSG 的 DC/AC 变换器并网和储能单元并入直流微网存在类比关系, 其参数对应关系如表 1 所示。

表 1 含 AVSG 的 DC/AC 逆变器与双向 DC/DC 变换器的对应参数

Table 1 Corresponding parameters of DC/AC inverter with AVSG and bidirectional DC/DC converter

含 AVSG 的 DC/AC 逆变器	DC/DC 变换器
ω_0	u_0
P_0	i_0
J	C_v
W_v	W_c

根据表 1 的参数对应关系, 可类比出储能单元通过双向 DC/DC 并入直流微网的虚拟惯性控制, 其表达式为

$$i_{\text{set}} - i_0 - D_v(u_0^* - u_{\text{ref}}) \approx C_v \frac{du_0^*}{dt} \quad (4)$$

式中: i_{set} 为给定输出电流; D_v 为虚拟阻尼系数; u_0^* 为直流母线电压参考值; u_{ref} 为直流母线电压额定值。连接储能单元的双向 DC/DC 变换器采用式(4)控制方式能增强直流微网的惯性支撑, 其并联的虚拟大电容增强了直流微网系统的惯性, 当母线电压发生突变时, 该大电容 C_v 能迅速模拟输出电流, 增强系统惯性, 故 C_v 也称为虚拟惯量。 D_v 为虚拟阻尼系数, 描述母线电压发生单位变化时, 该控制输出的有功变化量, 使得该控制具备阻尼振荡能力。阻尼系数越大, 直流母线电压恢复越快。其惯性控制框图如图 3 所示。

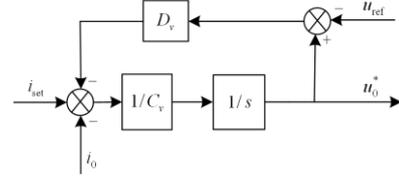


图 3 虚拟惯性控制

Fig. 3 Virtual inertial control

2 虚拟惯量和阻尼系数自适应控制

对于本文所类比的虚拟惯性控制如式(4)所示, 进行公式变化可得式(5)、式(6)分别为虚拟惯量参数 C_v 和虚拟阻尼系数 D_v 与电压输出特性的关系。

$$\frac{du_0^*}{dt} = \frac{i_{\text{set}} - i_0 - D_v(u_0^* - u_{\text{ref}})}{C_v} \Delta u_0 (du_0 / dt) \quad (5)$$

$$(u_0^* - u_{\text{ref}}) = \frac{i_{\text{set}} - i_0 - C_v \frac{du_0^*}{dt}}{D_v} \quad (6)$$

由式(5)可以看出, 当 $i_{\text{set}} - i_0 - D_v(u_0^* - u_{\text{ref}})$ 不变时, 虚拟惯量 C_v 变大能抑制电压变化率 du_0 / dt 的变化; 式(6)中当 $i_{\text{set}} - i_0 - C_v \frac{du_0^*}{dt}$ 不变时, 虚拟阻尼系数 D_v 增大能减小电压偏差。通过调节虚拟惯量和阻尼系数的大小可以改善系统响应特性。

首先取固定的虚拟惯量以及阻尼系数, 当系统受到扰动时, 直流母线电压变化如图 4 所示。

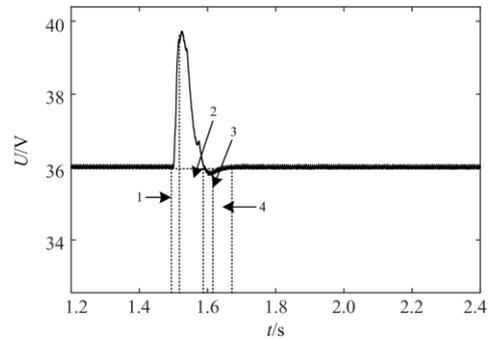


图 4 负荷波动时直流母线电压变化曲线图

Fig. 4 DC bus voltage change curve when load fluctuates

表 2 中 P(positive)为正、N(negative)为负, 为了便于分析, 将直流母线电压振荡分为 4 个区间, 区间 1 中电压不断增大偏离额定值, 电压变化率突增之后减小至零, 此时需要增大 C_v 和 D_v 来抑制电压变化率以及电压偏差的增加; 在区间 2、3、4 中 C_v 和 D_v 取值原则类似。通过分析可以得出电压变化率和直流母线电压偏离量共同影响虚拟惯量和阻尼系数的选取, 其具体设计原则如表 2 所示。

表 2 不同情况下 C_v 和 D_v 的选取原则
Table 2 Selecting principle of C_v and D_v under

different conditions					
区间	$\frac{du_0}{dt}$	Δu_0	$\Delta u_0(\frac{du_0}{dt})$	C_v	D_v
1	P	P	P	增加	增加
2	P	N	N	减小	适当增加
3	N	N	P	适当增加	适当增加
4	N	P	N	适当减小	适当增加

由表 2 中虚拟惯量和阻尼系数与电压变化率以及电压偏差之间的关系, 设计的灵活惯量如式(7)所示。

$$C_v = \begin{cases} C_0 & (|\Delta u_0| < u_d) \cap (|du_0/dt| < k_u) \\ C_0 + k_c |du_0/dt| & |du_0/dt| > k_u \end{cases} \quad (7)$$

自适应虚拟阻尼系数如式(8)所示。

$$D_v = \begin{cases} D_0 & |\Delta u_0| < u_d \\ D_0 + k_d |\Delta u_0| & |\Delta u_0| > u_d \end{cases} \quad (8)$$

式中: C_0 和 D_0 分别为系统较为稳定情况下的虚拟惯量和阻尼系数; k_c 和 k_d 为调节系数; k_u 为电压变化率阈值; u_d 为母线电压差变化阈值。在设计自适应参数时需要获取电压变化率, 为了减少微分环节对干扰的敏感性, 本文采取文献[18]的方法获取电压变化率, 如图 5 所示。虚拟惯量和阻尼系数自适应控制具体控制框图设计, 如图 6 所示, 图中: k_{dr} 为下垂系数; Δu 为直流母线电压额定值和实际值的差值; i_b^* 为储能单元输出电流的参考值。

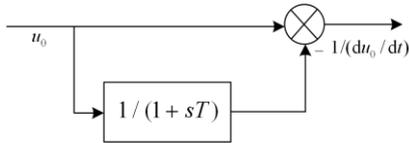


图 5 电压变化率获取图

Fig. 5 Voltage change rate obtaining graph

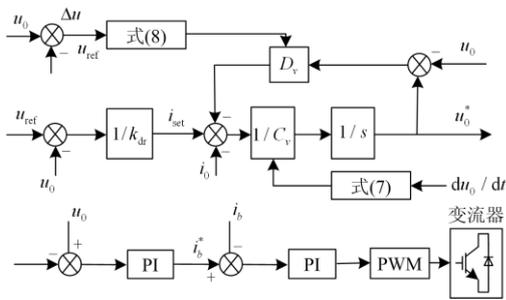


图 6 虚拟惯量和阻尼系数自适应控制框图

Fig. 6 Block diagram of adaptive virtual inertia and damping coefficient control

3 参数设计与分析

3.1 小信号建模

为了研究虚拟惯量和阻尼系数自适应控制应用于直流微网储能单元的双向 DC/DC 时, 其控制参数变化所产生的影响, 对该控制应用于双向 DC/DC 换流器进行小信号建模。根据图 2 可知, 双向 DC/DC 变换器小信号模型为

$$\begin{cases} sC_b \hat{u}_0 = (1-D_1)\hat{i}_b - I_b \hat{d}_1 - \hat{i}_0 \\ sL\hat{i}_b = \hat{u}_b - R\hat{i}_b - (1-D_1)\hat{u}_0 + u_0 \hat{d}_1 \end{cases} \quad (9)$$

式中: \hat{u}_0 、 \hat{i}_b 、 \hat{d}_1 、 \hat{i}_0 、 \hat{u}_b 分别为直流母线电压、储能单元输出电流、占空比、变换器输出电流、储能单元输出电压 u_b 的扰动量; I_b 、 D_1 分别为其对应变量的稳态值。

由式(9)可得 \hat{u}_0 和 \hat{i}_b 与扰动量之间的关系为

$$\begin{cases} G_{u1} = \frac{\hat{u}_0}{\hat{i}_b} = \frac{1-D_1}{sC_b}, G_{u2} = \frac{\hat{u}_0}{\hat{d}_1} = \frac{-I_b}{sC_b} \\ G_{u3} = \frac{\hat{u}_0}{\hat{i}_b} = \frac{-1}{sC_b} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} G_{i1} = \frac{\hat{i}_b}{\hat{u}_b} = \frac{1}{sL+R}, G_{i2} = \frac{\hat{i}_b}{\hat{u}_0} = \frac{-(1-D_1)}{sL+R} \\ G_{i3} = \frac{\hat{i}_b}{\hat{d}_1} = \frac{u_0}{sL+R} \end{cases} \quad (11)$$

根据图 6 进行小信号分析可得

$$\begin{cases} \hat{d}_1 = \hat{u}_0^* \cdot G_v \cdot G_i - \hat{u}_0 \cdot G_v \cdot G_i - \hat{i}_b \cdot G_i \\ \hat{u}_0^* = u_{ref} \cdot \frac{k_{dr} + D_v}{sC + D_v} - \hat{u}_0 \cdot \frac{k_{dr}}{sC + D_v} - \hat{i}_0 \cdot \frac{1}{sC + D_v} \end{cases} \quad (12)$$

式中, \hat{u}_0^* 为虚拟惯量和阻尼系数控制输出电压的扰动量。由式(12)可得 \hat{d}_1 和 \hat{u}_0^* 与扰动量之间的关系为

$$\begin{cases} G_{d1} = \frac{\hat{d}_1}{\hat{u}_0^*} = G_v \cdot G_i, G_{d2} = \frac{\hat{d}_1}{\hat{u}_0} = -G_v \cdot G_i \\ G_{d3} = \frac{\hat{d}_1}{\hat{i}_b} = -G_i \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} G_{v1} = \frac{\hat{u}_0^*}{\hat{u}_{ref}} = \frac{k_{dr} + D_v}{sC_v + D_v}, G_{v2} = \frac{\hat{u}_0^*}{\hat{u}_0} = -\frac{k_{dr}}{sC_v + D_v} \\ G_{v3} = \frac{\hat{u}_0^*}{\hat{i}_0} = -\frac{1}{sC_v + D_v} \end{cases} \quad (14)$$

由此得到自适应虚拟惯量和阻尼系数控制的直流微网双向 DC/DC 变换器的小信号框图, 如图 7 所示。

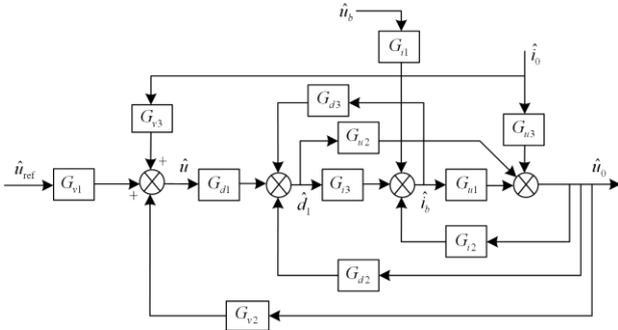


图 7 虚拟惯量和阻尼系数自适应控制的双向 DC/DC 变换器的小信号框图

Fig. 7 Small-signal block diagram of bidirectional DC/DC converter with adaptive virtual inertia and damping coefficient control

根据小信号框图可知, \hat{u}_0 和 \hat{i}_0 的闭环传递函数 TF 可表示为

$$TF = \hat{u}_0 / \hat{i}_0 = [G_{u3} + G_{v3} \cdot G_{d1} \cdot (G_{u2} + G_{i3} \cdot G_{u1})] / (1 - G_{u1} \cdot G_{i1} - G_{i3} \cdot G_{u1} \cdot G_{d2} - G_{u2} \cdot G_{d2} - G_{d1} \cdot G_{i3} \cdot G_{u1} \cdot G_{v1} - G_{d1} \cdot G_{u1} \cdot G_{v2}) \quad (15)$$

3.2 参数设计

为了排除其余参数对系统稳定性的影响, 对本文直流微网双向 DC/DC 变换器虚拟惯量和阻尼系数自适应控制策略中的双闭环 PI 参数进行设计。根据电流内环和电压外环的设计原则, 为了保证较好的稳定裕度和动态性能^[15], 根据文献[15]的方法, 令电流内环比例、积分参数分别为 0.01、10, 在确定内环 PI 参数的基础上, 确定外环比例、积分参数分别为 1、10。

同时文献[15]中阐述了下垂系数对系统稳定性与惯性的影响, 给出了下垂系数的计算式为 $k_{dr} = i_{max} / \Delta u$, 其中 i_{max} 为 i_0 的最大值, Δu 为直流微网的电压波动范围。

针对惯性调节参数, 由式(7)、式(8)可知, 在超出阈值部分均为一次函数。 k_c 和 k_d 为一次函数截距, 可以调节 C_v 和 D_v 的变化率, 可采用模糊控制进行调节。在区间 1, 电压迅速变化, 此时需要较大的 k_c 和 k_d 使得 C_v 和 D_v 迅速变大, 快速抑制直流母线电压波动。区间 2 则需要较小的 k_c 、较大的 k_d , 增大 D_v 加速电压恢复。在区间 3 适当增加 k_c 即可。区间 4 可以适当减小 k_c , 加快电压恢复到原位置。

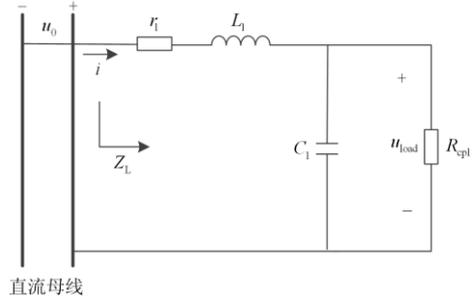
4 直流微网稳定性分析

采用阻抗比分析法^[22-23]验证系统稳定性。在图

1 的直流微网拓扑结构图中, 光伏采用了最大功率点跟踪控制策略, 可以视为恒功率电源。该恒功率电源和负载可等效为负电阻, 其电阻表示为

$$R_{cpl} = -\frac{u_0}{P_{cpl} - P_{pv}} \quad (16)$$

式中: R_{cpl} 为恒功率负载; P_{cpl} 为输入负荷端功率; P_{pv} 为光伏输出功率。恒功率负载侧的等效电路图如图 8 所示。



直流母线

图 8 负载侧等效电路图

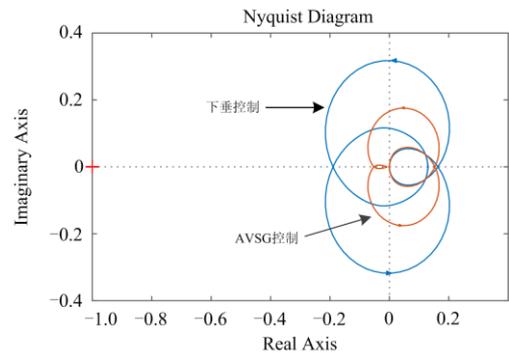
Fig. 8 Load side equivalent circuit diagram

根据等效电路图可以得到负载端输入阻抗, 如式(17)所示。

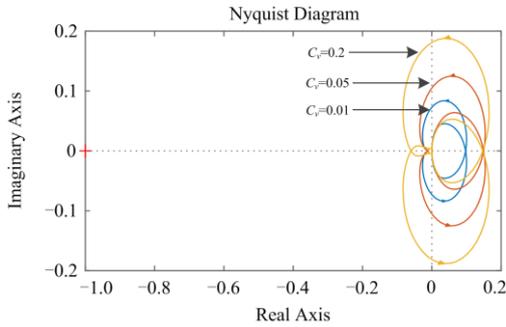
$$Z_L = r_i + sL_1 + \frac{R_{cpl}}{sC_1R_{cpl} + 1} \quad (17)$$

式中: r_i 为电感 L_1 串联电阻; Z_L 为储能侧输出阻抗。环路增益 $T_m = Z_b / Z_L$, 本文采用含自适应虚拟惯量和阻尼系数控制时, 输出阻抗 $Z_L = TF$ 。

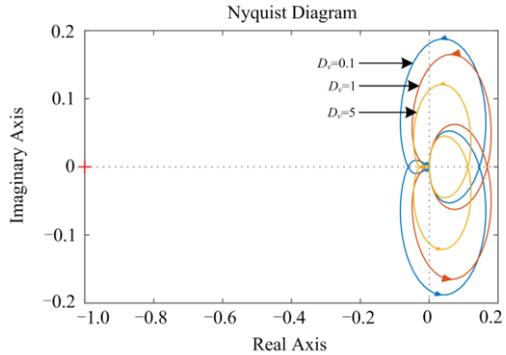
仅采用下垂控制与采用含 AVSG 控制进行对比, 如图 9(a)所示, 含 AVSG 控制 Naquist 曲线距离 $(-1,0)$ 更远, 稳定性裕度更好。在虚拟惯量和阻尼系数自适应控制中取不同 C_v 、 D_v 值时, 对应的 Naquist 曲线如图 9(b)、图 9(c)所示, C_v 变大, 稳定裕度降低, C_v 值过大时可能导致系统恢复时间过长, 甚至失调。因此 C_v 值存在上限, 为了尽可能提



(a) 不同控制策略的Nyquist曲线图



(b) C_v 变化时对应的Nyquist曲线图



(c) D_v 变化时对应的Nyquist曲线图

图9 直流微网系统的Nyquist曲线图

Fig. 9 Nyquist curves of the DC microgrid system

高其系统惯性，同时参考文献[21]，虚拟惯量 C_v 应满足式(18)。

$$C_v \leq \frac{i_{\max}}{\max\{u_0(du_0/dt)\}} \quad (18)$$

式中， i_{\max} 为 i_0 最大值。由图 9(c)可知， D_v 值越大，系统越稳定。设置 $D_v > 0$ 以满足系统稳定性要求，调节系数和阈值的选取根据实际需求选择。

5 仿真分析与实验验证

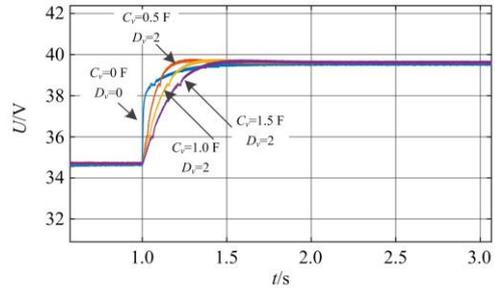
为了验证本文所提自适应控制策略的有效性以及理论的正确性，在 Matlab/Simulink 中搭建图 1 所示的直流微网模型，光伏采用最大功率点跟踪控制，蓄电池并网的双向 DC/DC 变换器根据需要采取不同的控制策略，其对应参数如表 3 所示。

表3 系统参数

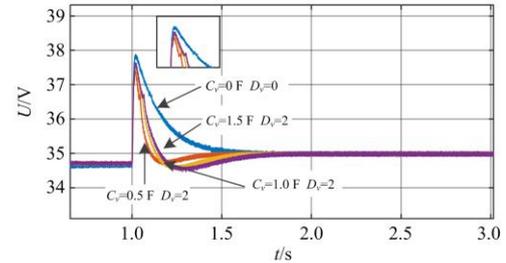
Table 3 System parameters

参数名称	数值	参数名称	数值
光伏光照强度/(W/m ²)	1 000	最高输出功率/W	1 000
直流母线额定电压/V	36	蓄电池额定电压/V	24
蓄电池额定容量/A	50	滤波电容/mF	1
负载/ Ω	6	下垂系数	1

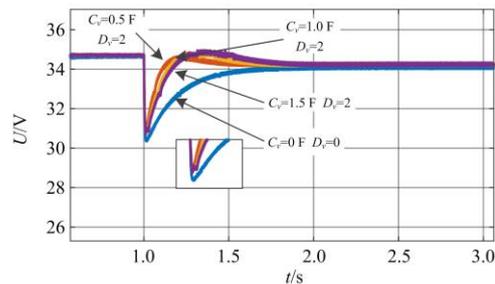
图 10、图 11 分别描述了虚拟惯量和阻尼系数对直流微网的影响，蓝色线为参照组，参照组仅采用下垂控制。图 10 对照组阻尼系数设定为 2，虚拟惯量分别为 0.5 F、1 F、1.5 F；图 11 对照组虚拟惯量设定为 1 F，虚拟阻尼系数分别为 1、3、6。在图 10、图 11(a)中，直流母线参考电压在 1 s 时从 35 V 增加至 40 V。当系统仅工作于下垂控制时，直流母线电压在 1 s 时发生突变，电能质量下降。随着 C_v 增加，直流母线电压变化率降低，抑制直流母线电压突变，提高电能质量。但虚拟电容过大也会导致系统响应过慢甚至不稳定；随着虚拟阻尼系数 D_v 增加，直流母线电压恢复速度加快，改善了直流母线电压的动态响应性能。



(a) 虚拟电容对直流母线电压动态响应的影响



(b) 光照强度由 80 W/m²变为 200 W/m²

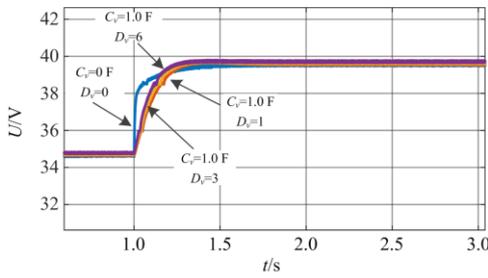


(c) 负载由 6 Ω 变为 3 Ω

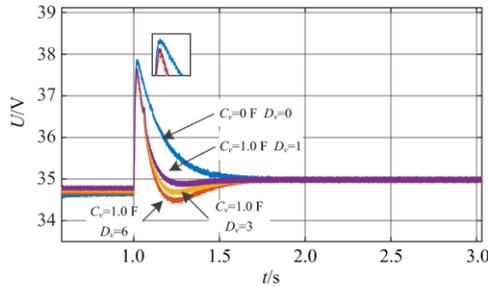
图 10 虚拟电容对直流微网的影响

Fig. 10 Impact of virtual capacitance on DC microgrid

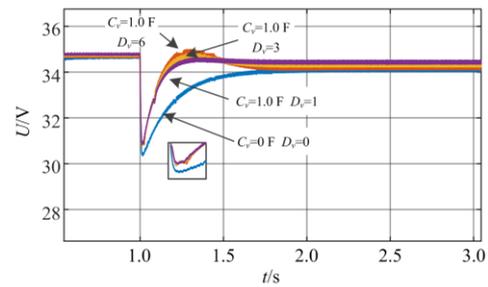
图 10、图 11(b)、图 11(c)分别为光伏系统光照强度发生突变、负载发生突变时母线电压的变化情况。虚拟惯量 C_v 越大，母线电压恢复的变化率越低，在电压靠近参考电压时会产生一个小波动，减缓了



(a) 虚拟阻尼系数对直流母线电压动态响应的影响



(b) 光照强度由80 W/m²变为200 W/m²



(c) 负载由6 Ω变为3 Ω

图 11 节虚拟阻尼系数对直流微网的影响

Fig. 11 Impact of virtual damping coefficient on DC microgrid

电压恢复速度, 降低了系统的稳定性。虚拟阻尼系数 D_v 越大, 其电压恢复的变化率越高, 在电压靠近参考电压时恢复速度加快, 随着虚拟阻尼系数变大, 在电压即将恢复时基本没有波动, 加快了电压的恢复效率。

如图 12 所示, 当参考电压变化时, AVSG、虚拟惯量和阻尼系数自适应控制均明显增加了系统惯性支撑。相比于 AVSG 控制, 在自适应控制下母线电压初始波动剧烈, 但是时间非常短。在电压变化中期自适应控制下, 母线电压斜率小于本文确定的最优固定值虚拟惯量控制。在电压即将恢复时, AVSG 控制下的母线电压有轻微振荡, 而自适应控制可以抑制振荡, 保证系统稳定性。采用 AVSG 固定参数控制和本文所提控制的调节时间分别为 0.61 s、0.47 s。

图 13(a)为系统受到光照扰动时母线电压的变

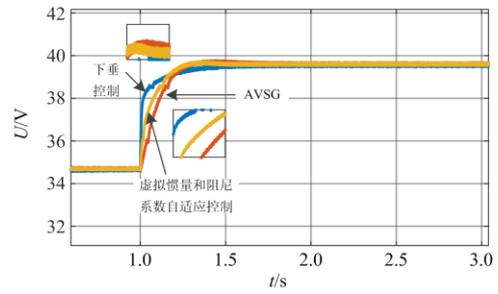
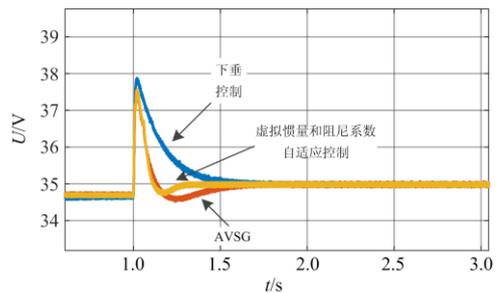
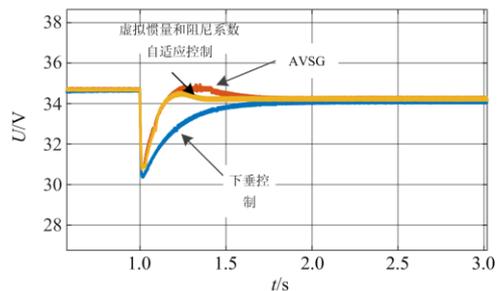


图 12 不同控制方法对直流母线动态响应的影响

Fig. 12 Impact of different control methods on DC bus dynamic response



(a) 光照强度由80 W/m²变为200 W/m²



(b) 负载由6 Ω变为3 Ω

图 13 不同控制方法对于扰的抑制作用

Fig. 13 Inhibition effect of different control methods on interference

化情况。系统工作于下垂控制、AVSG 及虚拟惯量阻尼系数自适应控制时超调量分别为 3.2 V、2.84 V、2.81 V; 其恢复时间分别为 0.7 s、0.6 s、0.28 s。在图 13(b)负载扰动中, 三种控制下的超调量分别为 4.25 V、3.92 V、3.9 V; 调节时间为 0.8 s、0.65 s、0.4 s。虚拟惯量和阻尼系数自适应控制不仅能为系统提供有效的惯性支撑, 降低超调量, 还能加速电压恢复, 缩短调节时间。

图 14 给出了在直流微网受到扰动的情况下, 虚拟惯量和阻尼系数自适应控制策略下 C_v 、 D_v 的变化过程。在受到扰动瞬间, 虚拟惯量和阻尼系数快速增加, 有效抑制直流母线电压突变。

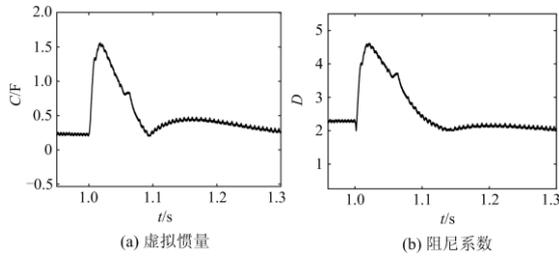


图 14 虚拟惯量和阻尼系数的波动情况

Fig. 14 Fluctuations of virtual inertia and damping coefficient

为了进一步验证理论分析和仿真结果的正确性，本文搭建了基于 RT-LAB 的半实物实验平台，系统各参数与 Matlab/Simulink 仿真参数一致，如表 3 所示。

图 15 为半实物实验平台，其中 DSP 执行本文所提出的自适应控制策略，在 RT-LAB 内部搭建直流微网实时仿真模型以及光伏逆变器控制算法。RT-LAB 的输出信号连接示波器用以观察系统运行效果，具体效果如图 16 所示。在 $t=1\text{ s}$ 处直流母线参考电压从 35 V 变为 40 V，AVSG、虚拟惯量和阻尼系数自适应控制明显增加了系统惯性支撑；在 $t=2\text{ s}$ 处光照强度由 80 W/m^2 变为 200 W/m^2 ，在 $t=3\text{ s}$ 处负载由 $6\ \Omega$ 变为 $3\ \Omega$ 。在 AVSG、虚拟惯量

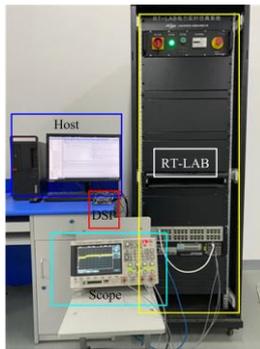


图 15 半实物实验平台

Fig. 15 Hardware in loop experiment platform

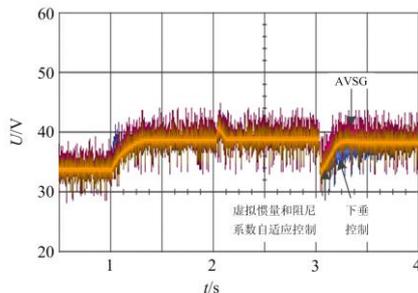


图 16 不同控制方式下电压对比半实物实验结果

Fig. 16 Hardware in loop experiment results of voltage comparison under different control methods

和阻尼系数自适应控制下，系统抗干扰能力更强，发生干扰时的波动幅度更小。相对 AVSG 控制，在自适应控制下母线电压临近恢复时几乎没有波动。

综上所述，相对于固定虚拟惯量和阻尼系数，虚拟惯量和阻尼系数的自适应控制策略不仅能减少直流母线电压偏差量，降低超调量，还能缩短电压恢复时间，改善直流母线电压的质量。

6 结论

为了解决直流微网低惯性引发的电压质量问题，本文通过与含 AVSG 的 DC/AC 逆变器类比，将 AVSG 应用于直流双向 DC/DC 换流器中，通过相关输出特性分析，提出一种虚拟惯量和阻尼系数自适应控制策略。通过理论分析与实验验证得出下列结论。

1) 通过构建虚拟惯量和阻尼系数自适应控制策略，有效解决了直流微网的低惯量以及电压偏差问题，提高了电压质量。同时该自适应控制策略为系统提供了自适应的惯性支撑，使直流母线电压拥有更好的动态特性。

2) 通过阻抗比分析得到虚拟惯量和虚拟阻尼系数变化对双向 DC/DC 提供惯性支撑的能力以及系统稳定性的影响，理论上证明了自适应虚拟惯量和阻尼系数控制对系统的稳定性支撑。

3) 自适应虚拟惯量和阻尼系数控制策略能够改善直流母线电压临近参考电压的振荡特性，解决虚拟惯性和虚拟阻尼系数控制的矛盾，提升系统运行稳定性。

4) 本文仅针对在直流微网中，单个储能单元的双向 DC/DC 变换器进行虚拟惯量和阻尼系数的自适应控制，未考虑存在多储能变换器的协调控制，这是本文的不足之处，也是下一步的研究方向。

参考文献

- [1] LIU J, YANG D J, 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(1): 1-8.
- [2] DRAGICEVIC T, LU X, V ASQUEZ 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.
- [3] 孙亮, 杨晓飞, 孙立国, 等. 基于改进虚拟同步发电机的多逆变器频率无差控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 18-27.
- [4] SUN Liang, YANG Xiaofei, SUN Ligu, et al. Multi-inverter frequency non-difference control strategy based on improved virtual synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 18-27.
- [4] 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.
- [5] ADIB A, FATEH F, MIRAFZAL B. Smart inverter stability enhancement in weak grids using adaptive virtual-inductance[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(1): 814-823.
- [6] WANG Y, WANG C, XU L, et al. Adjustable inertial response from the converter with adaptive droop control in DC grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 3198-3209.
- [7] 王同森, 程雪坤. 计及转速限值的双馈风机变下垂系数控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 29-36.
- WANG Tongsen, CHENG Xuekun. Variable droop coefficient control strategy for doubly-fed wind turbines considering speed limit[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 29-36.
- [8] ZHANG X, ZHONG Q C, KADIRKAMANATHAN V, et al. Source-side series-virtual-impedance control to improve the cascaded system stability and the dynamic performance of its source converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5854-5866.
- [9] LI C, LI Y, CAO Y J, et al. Virtual synchronous generator control for damping DC-side resonance of VSC-MTDC system[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(3): 1054-1064.
- [10] 朱晓荣, 韩丹慧. 基于虚拟惯性控制的直流微电网稳定性分析及其改进方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(12): 121-127.
- ZHU Xiaorong, HAN Danhui. Stability analysis of DC microgrid based on virtual inertia control and its improvement method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 121-127.
- [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, 31(12): 158-167.
- ZHU Xiaorong, XIE Zhiyun, JING Shuzhi. Virtual inertia control and stability analysis of DC microgrid[J]. Power System Technology, 2017, 31(12): 158-167.
- [12] 孟建辉, 张赞, 范莹, 等. 基于直流微网虚拟电容控制的等效电容计算方法[J]. 电力建设, 2020, 41(7): 25-32.
- MENG Jianhui, ZHANG Yun, FAN Ying, et al. Equivalent capacitance calculation method based on virtual capacitance control of DC microgrid[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(7): 25-32.
- [13] 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. Electric vehicle control strategy based on virtual inertia adaptive algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 134-141.
- [14] 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 type of virtual DC motor control technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(10): 3029-3038.
- [15] 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 router based on virtual motor control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3541-3550.
- [16] ZHU X Y, MENG F Q, XIE Z Y, et al. An inertia and damping control method of DC-DC converter in DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(2): 799-807.
- [17] 张祥宇, 李浩, 付媛. 含新型虚拟电机的直流微网动态稳定性分析与自适应电压惯性控制[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2865-2873.
- ZHANG Xiangyu, LI Hao, FU Yuan. Dynamic stability analysis and adaptive voltage inertia control of DC microgrid with a new type of virtual motor[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2865-2873.
- [18] WU W H, CHEN Y D, LUO A, 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.
- [19] ZHANG Y, SUN Q Y, ZHOU J G, 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.
- [20] REN M W, LI T, SHI K, et al. Coordinated control strategy of virtual synchronous generator based on adaptive moment of inertia and virtual impedance[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2021, 11(1): 99-110.
- [21] 杨赞, 梅飞, 张宸宇, 等. 虚拟同步发电机转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 125-131.
- YANG Yun, MEI Fei, ZHANG Chenyu, et al. Virtual synchronous generator moment of inertia and damping coefficient cooperative adaptive control strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 125-131.
- [22] WANG R, SUN Q Y, MA D Z, et al. Line impedance cooperative stability region identification method for grid-tied inverters under weak grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 2856-2866.
- [23] HOU X C, SUN Y, ZHANG X, et al. Improvement of frequency regulation in VSG-based AC microgrid via adaptive virtual inertia[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 35(2): 1589-1620.

收稿日期: 2021-07-02; 修回日期: 2021-09-26

作者简介:

曾国辉(1975—), 男, 副教授, 研究方向为直流微网控制技术; E-mail: zenggh@sues.edu.cn

赵晋斌(1972—), 男, 通信作者, 教授, 博导, 研究方向为电力电子电路智能化模块化控制及新能源发电技术。

E-mail: zhaojinbin@shiep.edu.cn

(编辑 许威)