

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190533

## 直流电网阻抗建模与振荡机理及稳定控制方法

黄旭程<sup>1</sup>, 刘亚丽<sup>2</sup>, 陈燕东<sup>1</sup>, 何志兴<sup>1</sup>, 伍文华<sup>1</sup>, 宁倩<sup>1</sup>, 刘舒怡<sup>1</sup>, 罗安<sup>1</sup>

(1. 国家电能变换与控制工程技术研究中心(湖南大学), 湖南 长沙 410082;

2. 全球能源互联网研究院有限公司, 北京 102209)

**摘要:** 维持直流母线电压稳定是直流电网高效、安全、稳定运行的前提。多个电压源变换器(Voltage Source Converter, VSC)经下垂控制接入直流电网, 下垂控制等效于在VSC直流端口增加虚拟电阻, 实现多VSC之间的功率分配的同时增加了系统阻尼。但研究发现, 采用直流电压下垂控制的VSC, 其输出阻抗会在电压控制带宽外呈现负阻性, 该负阻抗会与线路阻抗、负载输入电容及恒功率负载(Constant Power Load, CPL)相互作用, 引起直流系统振荡。针对此问题, 建立了典型的单母线直流电网系统小信号模型, 分析了直流系统的稳定性。提出一种虚拟阻容性阻抗的稳定控制方法, 使得VSC输出阻抗在电压控制带宽外保持较大的正阻性, 抑制直流系统的振荡。同时所提方法能够增大VSC直流端口的容性阻抗, 增强直流系统的惯性, 提升母线电压抗负载波动的能力。最后, 仿真验证了所提控制方法的正确性和有效性。

**关键词:** 直流电网; 电压源变换器VSC; 下垂控制; 高频振荡; 阻抗稳定性; 虚拟阻容性阻抗

### Impedance-based modeling, stability analysis and virtual damping approach in DC grid

HUANG Xucheng<sup>1</sup>, LIU Yali<sup>2</sup>, CHEN Yandong<sup>1</sup>, HE Zhixing<sup>1</sup>, WU Wenhua<sup>1</sup>, NING Qian<sup>1</sup>, LIU Shuyi<sup>1</sup>, LUO An<sup>1</sup>

(1. National Electric Power Conversion and Control Engineering Technology Research Center (Hunan University),

Changsha 410082, China; 2. Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

**Abstract:** Maintaining DC bus voltage stability is a prerequisite for efficient, safe and stable operation of DC power grid. Multiple Voltage Source Converters (VSCs) integrates into DC grid with voltage droop approach. Voltage droop approach is equivalent to install a virtual resistor in series to VSC's DC port. In general, droop approach realizes the power sharing between VSCs and improves the damping of DC system. However, research finds that when VSC is running with DC voltage droop approach, there is a negative resistance component in the output impedance of the VSC. The DC-side voltage is easy to produce high-frequency oscillations, because of the negative resistance, the line parameters and the complex impedance interactions by Constant Power Load (CPL). For this issue, small-signal impedance-based model of the DC power system is modelled and the stability of the DC system is analyzed in this paper. Next, a virtual capacitive resistance impedance control approach is proposed to reshape the output impedance of the VSC, the proposed approach keeps the positive impedance outside the bandwidth of voltage loop and it can suppress the oscillations of the DC grid. Meanwhile, the proposed approach improves the capacitive component of the output impedance of VSC; hence, the dynamic response of the DC bus is smoothed and the inertia of the system can be improved. Finally, simulation results validate the correctness and efficiency of this proposed control approach.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5455ZS170025) "Research on Inertial Control Method and Port Stability of Power Electronic Converter Connected to DC Power Grid".

**Key words:** DC grid; VSC; droop approach; high-frequency oscillations; impedance-based stability; virtual capacitive resistance impedance

## 0 引言

直流电网具有效率高, 且不存在频率、无功功

率相关问题等优点<sup>[1-3]</sup>, 在海岛供电、多电飞机、舰船、智慧园区等军事和工业领域有良好的应用前景<sup>[4-6]</sup>, 是当前的研究热点之一。直流电网中没有无功功率的波动, 直流母线电压是衡量直流电网安全与稳定运行的关键, 但直流电网中含有大量的电力电子变换器, 各变换器之间的相互作用、有功功率的变化都会引起母线电压波动, 甚至发生振荡失稳

**基金项目:** 国家电网公司科技项目资助(5455ZS170025)“电力电子变换器接入直流电网的惯性控制方法与端口稳定性研究”

现象, 严重影响了直流电网稳定运行<sup>[7]</sup>。

负增量阻抗特性常出现在 CPL 的输入阻抗中<sup>[8-10]</sup>, 该负增量阻抗会导致系统动态特性变差, 甚至引起系统电压振荡<sup>[10]</sup>, 是影响直流电网电压稳定的主要因素之一。线路阻抗和变换器直流端口的滤波电容也是影响直流系统稳定的重要因素, 其构成的 LC 滤波环节会促进源变换器侧的输出阻抗并与 CPL 等效阻抗的交互, 引起系统失稳。为研究直流系统中 CPL 所造成的不稳定现象, Middlebrook 教授指出互联系统中不稳定问题的根源是源-负载变换器的阻抗比不满足奈奎斯特稳定性要求<sup>[11]</sup>。在直流系统中, 通过修正负载变换器的输入阻抗或源变换器的输出阻抗可解决这类由恒功率负载变换器造成的不稳定问题<sup>[12-16]</sup>, 有无源和有源等方法<sup>[16-17]</sup>。无源方法利用电阻、电感或电容等元件构成无源阻尼支路来调整系统阻尼, 但会带来额外的功率损耗并增加装置体积。有源方法则通过电流或电压的控制, 在系统中等效出阻尼支路。目前, 大多有源方法主要是通过调节负载转换器的输入阻抗来提高互联系统的稳定性, 但这会牺牲负载的动态性能<sup>[18]</sup>。为此, 文献[13]引入虚拟电阻来调节源变换器的输出阻抗, 既保证负载动态性能又增加了系统阻尼。

下垂控制等效于在源变换器输出端串联虚拟电阻, 可以提升系统阻尼并抑制电压振荡, 且在多台源变换器并联时能够实现功率自动分配, 是直流电网控制中常见的控制方法<sup>[4,19-20]</sup>。在多台储能 DC/DC 变换器采用下垂控制的直流电网中, 线路电感与变换器稳压电容构成的低阻尼 LC 环节会与电压源型变换器输出阻抗相互影响, 导致系统发生高频振荡, 为此文献[20]在常规下垂控制的基础上, 加入了基于低通滤波的有源阻尼。考虑多源多负载接入, 文献[4]提出了“全局下垂系数”的方法, 保证了系统的稳定性。然而, 下垂控制虽然降低了输出阻抗在电压环控制带宽内的幅值, 抑制了低频振荡, 但无法处理电压环控制带宽外的振荡问题<sup>[21]</sup>。而在多 VSC 经下垂控制作为源变换器的直流电网中, 现有基于电压下垂控制的直流电网稳定性研究很少涉及控制带宽、线路等效电感、滤波电容、变换器控制参数等因素对系统稳定性的影响。此外, 直流电网中功率源的输出波动、负荷频繁投切等都会引起直流母线电压波动, 威胁系统的高效、安全运行。多 VSC 作为源变换器接入直流电网不仅要抑制直流侧振荡, 也要维持直流侧母线稳定。通过虚拟惯性控制可以有效地抑制母线电压突变<sup>[22-24]</sup>, 但现有的直流电网惯性增强控制主要关注于惯性

的实现与参数选取, 未综合考虑电压振荡与电压波动抑制来修正源变换器的输出阻抗。

针对上述问题, 本文建立了包含 VSC、线路阻抗及恒功率负载的单母线直流电网系统小信号模型, 推导了系统的等效阻抗并分析了系统稳定性。研究表明, 采用直流电压下垂控制的 VSC, 其输出阻抗会在电压控制带宽外呈现负阻性, 降低了系统阻尼, 引起直流系统振荡问题。针对源变换器, 提出一种虚拟阻容性阻抗的稳定控制方法, 使得 VSC 在电压控制带宽外保持较大的正阻尼, 抑制直流侧振荡。由于容性阻抗的引入, 所提方法抑制系统振荡的同时可以增强系统的惯性, 提升母线电压抗负载波动的能力。在此基础上, 综合系统的稳定裕度与惯性, 给出了所提阻容性阻抗参数的选取方法。

## 1 系统结构和模型

典型的单母线直流供电系统如图 1 所示。多台 VSC 为直流电网供电, 并经线路、直流母线与恒功率负载互联。VSC 交流侧连接三相交流电源(发电机或交流电网), 工作在控制直流母线电压模式。图中,  $L_j$  为第  $j$  个源变换器 VSC 的线路电感,  $R_j$  为对应线路的等效电阻。  $L_{e,j}$  为第  $j$  个负载的输入电感,  $R_{e,j}$  为第  $j$  个负载的线路电阻,  $C_{e,j}$  为第  $j$  个负载的输入电容,  $v_{e,j}$  为第  $j$  个负载的输入电压。

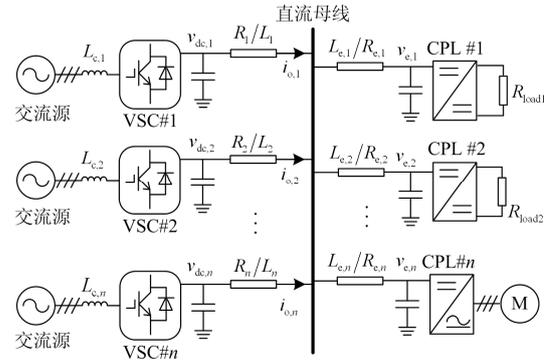


图 1 所研究直流电网结构图

Fig. 1 Configuration of the studied DC grid

### 1.1 VSC 数学模型

为对系统稳定性进行分析, 下面建立 VSC、恒功率负载的小信号模型。在  $dq$  同步旋转坐标系下, VSC 采用电压电流双闭环控制, 同时采用下垂控制来调节直流输出电压参考值, 其控制框图如图 2 所示。VSC 的数学表达式为

$$(R_{c,j} + sL_{c,j})i_{q,j} + \omega L_{c,j}i_{d,j} = v_{q,j} - v_{dc,j}d_{q,j} \quad (1)$$

$$(R_{c,j} + sL_{c,j})i_{d,j} - \omega L_{c,j}i_{q,j} = v_{d,j} - v_{dc,j}d_{d,j} \quad (2)$$

忽略开关损耗, 在 VSC 直流侧输出端有:

$$sC_{oc,j}v_{dc,j}=1.5(i_{q,j}d_{q,j}+i_{d,j}d_{d,j})-i_{o,j} \quad (3)$$

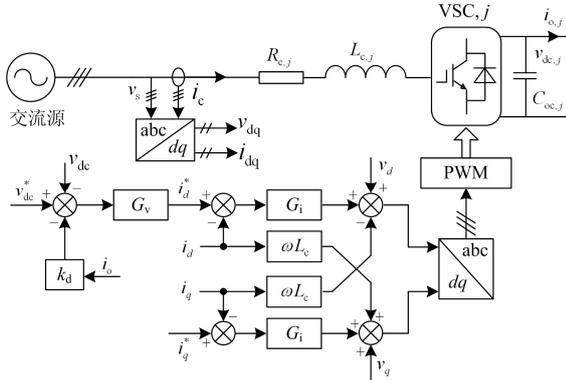


图 2 VSC 源变换器控制框图

Fig. 2 Control block of VSC source converter

图 2 中:  $L_c$  和  $R_c$  为交流滤波电感及等效电阻;  $i_d$ ,  $i_q$  和  $v_d, v_q$  分别为 VSC 输入交流电流和电压的  $d$  轴和  $q$  轴分量;  $\omega$  为电网角频率;  $d_d$  和  $d_q$  为 VSC 占空比的  $d$  轴和  $q$  轴分量;  $v_{dc}$  为 VSC 的直流输出电压;  $C_{oc}$  为直流输出电容;  $i_o$  为直流输出电流;  $s$  表示拉普拉斯算子; 上标 “\*” 表示对应变量的参考值, 大写字母表示对应变量的稳态值。

由式(1)一式(3), VSC 控制器数学模型可得

$$i_{d,j}^*=(v_{dc}^*-v_{dc,j}-k_{d,j}i_{o,j})G_v(s) \quad (4)$$

$$v_{dc,j}d_{d,j}^*=-\left(i_{d,j}^*-i_{d,j}\right)G_i(s)+v_{d,j}+\omega L_{c,j}i_{q,j} \quad (5)$$

$$v_{dc,j}d_{q,j}^*=-\left(i_{q,j}^*-i_{q,j}\right)G_i(s)+v_{q,j}-\omega L_{c,j}i_{d,j} \quad (6)$$

式中:  $k_d$  为下垂系数;  $G_v(s)=k_{p_v}+k_{i_v}/s$  为 VSC 电压 PI 外环传递函数;  $G_i(s)=k_{p_i}+k_{i_i}/s$  为 VSC 电流 PI 内环传递函数。

各 VSC 源变换器之间通过调节下垂系数来实现功率分配, 直流母线电压  $v_{bus}$  近似满足

$$V_{bus}=V_{dc,j}-I_{o,j}k_{d,j} \quad (7)$$

由式(2)一式(5), 可以得到 VSC 直流侧等效输出阻抗表达式为

$$Z_{dcr}=-\frac{\Delta v_{dc}}{\Delta i_o}=\frac{1}{den}+\frac{3I_d(R_c+sL_c)Hk_d}{2V_{dc}\cdot den}-\frac{3}{2}\frac{D_dHk_d}{den} \quad (8)$$

式中:

$$den=sC_{oc}-\frac{3}{2}D_dH+\frac{3I_d\left[\left(R_c+sL_c\right)H+D_d\right]}{2V_{dc}}$$

在控制回路上, 有

$$H=\frac{\Delta i_d}{\Delta v_{dc}}=-\frac{G_vG_i}{sL_c+R_c+G_i} \quad (9)$$

$Z_{dcr}$  即为 VSC 等效输出阻抗, 由于 VSC 是控

制直流母线电压的源变换器, 其可以等效为受控电压源串联输出阻抗。

## 1.2 恒功率负载数学模型

如图 3 所示, CPL 可以等效为负阻抗与电流源并联。CPL 的功率特性为

$$P_{CPL}=v\cdot i \quad (10)$$

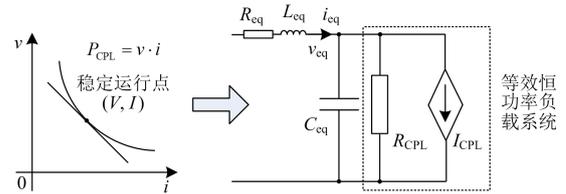


图 3 恒功率负载的负阻抗模型

Fig. 3 Negative incremental impedance of CPL

设  $v_{eq}$  为等效 CPL 输入电压, CPL 的等效输入阻抗和电流源可以表示为

$$R_{CPL}=-\frac{V_{eq}^2}{P}, I_{CPL}=2\frac{P}{V_{eq}} \quad (11)$$

可以将  $n$  个并联的 CPL 等效为 1 个 CPL, 考虑负载输入端存在滤波器和线路等效阻抗, 根据等效电路, 可得

$$\begin{cases} L_{eq}=\frac{1}{\sum_{j=1}^n\frac{1}{L_{e,j}}}, R_{eq}=\frac{1}{\sum_{j=1}^n\frac{1}{R_{e,j}}} \\ C_{eq}=\sum_{j=1}^n C_{e,j}, P=\sum_{j=1}^n P_{CPL,j} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $P_{CPL,j}$  为第  $j$  个负载的功率;  $L_{eq}$  为负载等效输入电感;  $R_{eq}$  为等效线路电阻;  $C_{eq}$  为等效输入电容;  $P$  为等效负载的功率。此外, 在直流母线上, 设  $i_{eq}$  为等效 CPL 输入电流, 有

$$v_{bus}=sL_{eq}i_{eq}+R_{eq}i_{eq}+v_{eq} \quad (13)$$

$$sC_{eq}v_{eq}=i_{eq}-\frac{P}{v_{eq}} \quad (14)$$

根据以上电路方程, 可建立直流电网系统的小信号模型, 进行稳定性分析。

## 2 直流电网振荡机理分析

基于上文模型, 本节研究所述直流系统的振荡机理及其影响因素。直流系统参数如表 1 所示。

由图 2, VSC 电流内环的开环传递函数可以表示为

$$\frac{i_d}{i_d^*}=\frac{G_i(s)}{R_c+sL_c} \quad (15)$$

表 1 直流电网系统参数

Table 1 Parameters of the DC grid systems

参数	数值
交流系统线电压	380 V
VSC 滤波电感参数 $L_c / R_c$	2 mH/0.01 $\Omega$
VSC 直流侧电容 $C_{oc}$	3 000 $\mu$ F
VSC 电流内环 PI 参数	$k_{p,i}=15, k_{i,i}=3\ 000$
VSC 电压外环 PI 参数	$k_{p,v}=1.2, k_{i,v}=200$
下垂系数 $k_d$	0.25
直流侧额定电压 $v_{dc}^*$	700 V
VSC 额定容量	100 kVA
IGBT 开关频率 $f_{sw}$	10 kHz
负载变换器输入电容 $C_B$	3 000 $\mu$ F
VSC 线路参数 $L_j/R_j$	33 $\mu$ H/0.03 $\Omega$
$j$ 号 CPL 线路参数 $L_{c,j}/R_{c,j}$	30 $\mu$ H/0.03 $\Omega$

一般而言, 电压外环带宽远小于电流内环带宽, 在设计电压环参数时, 可以将电流内环等效为一阶惯性环节。设  $\tau=1/f_{sw}$ , 则电压外环的开环传递函数可以表示为

$$\frac{v_{dc}}{v_{dc}^*} = \frac{G_v(s)}{sC_{oc}(\tau s + 1)} \quad (16)$$

由表 1 可得 VSC 的电流内环控制的开环截止频率为 1 140 Hz, 相角裕度为 88.4°; 电压外环的开环截止频率为 68.3 Hz, 相角裕度为 68.8°, 其在单位阶跃响应下, 阻尼比为 0.775, 超调量为 2.13%, 调节时间为 15 ms( $\pm 5\%$ 误差标准), VSC 具有良好的稳定裕度。

在考虑复杂的多源并联结构之前, 需要对直流电网系统进行简化, 以单个 VSC 为例, 来分析影响系统稳定性的因素。VSC 通过线路与 CPL 连接的系统等效电路图如图 4 所示。图中  $Z_1, Z_2, Z_3$  分别对应式(8)  $Z_{dcr}$  表达式中的第 1, 第 2, 第 3 项。设  $L_{dc}$  为 VSC 输出线路电感  $L_j$  和负载等效输入电感  $L_{eq}$  之和,  $R_{dc}$  为传输线路总电阻。

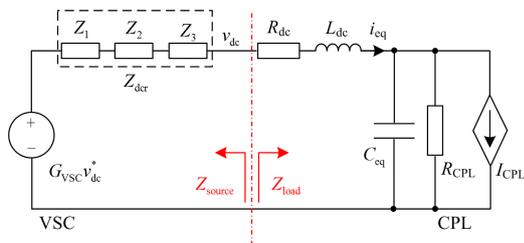


图 4 系统等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuit of single VSC and single CPL

根据等效电路图 4, 源阻抗  $Z_{source}$  即等于 VSC 输出阻抗  $Z_{dcr}$ , 同时等效负载阻抗  $Z_{load}$  表达式为

$$Z_{load} = \frac{R_{CPL}}{sC_{eq}R_{CPL} + 1} + R_{dc} + sL_{dc} \quad (17)$$

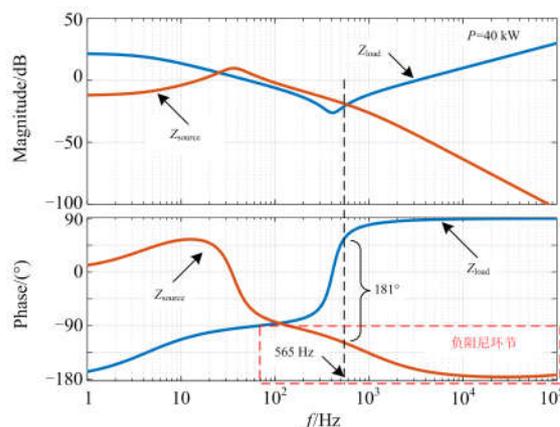
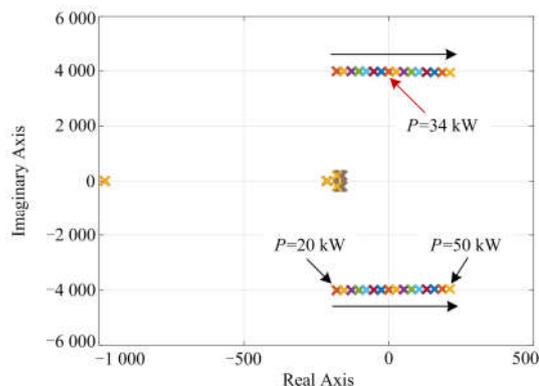


图 5 系统等效阻抗 Bode 图

Fig. 5 Bode plot of  $Z_{source}$  and  $Z_{load}$  in the DC system

结合式(8)和式(17), 可以绘制系统在输出功率为 40 kW 工况下的阻抗 Bode 图, 如图 5 所示。在电压外环带宽外,  $Z_{source}$  的相角出现处于  $-90^\circ$  到  $-180^\circ$  的环节, 即负阻尼环节。分析式(8)发现  $Z_2$  会导致 VSC 输出阻抗出现负阻尼, 可知 VSC 下垂控制环节是形成该负阻尼环节的主要因素。在系统等效负载阻抗  $Z_{load}$  方面, 线路电感与负载输入电容会降低  $Z_{load}$  的幅值, 若其幅值小于  $Z_{source}$ , 同时  $Z_{source}$  处在负阻尼频段, 则系统在该频率附近呈负阻尼。若源变换器输出电压小幅下降(上升), 则会造成电流增加(减小), 进一步加剧了源变换器输出电压的下降(上升), 形成正反馈过程, 导致直流系统振荡。在图 5 中, 565 Hz 处,  $Z_{load}$  幅值小于  $Z_{source}$ , 同时两者的相相差大于  $180^\circ$ , 系统阻尼为负, 不稳定。

根据系统模型与等效电路, 进一步分析负载功率、VSC 下垂系数以及直流线路参数对直流系统稳定性的影响。图 6 所示为不同参数变化时, 直流系统的特征根轨迹。



(a) CPL 功率  $P$  变化对系统的影响

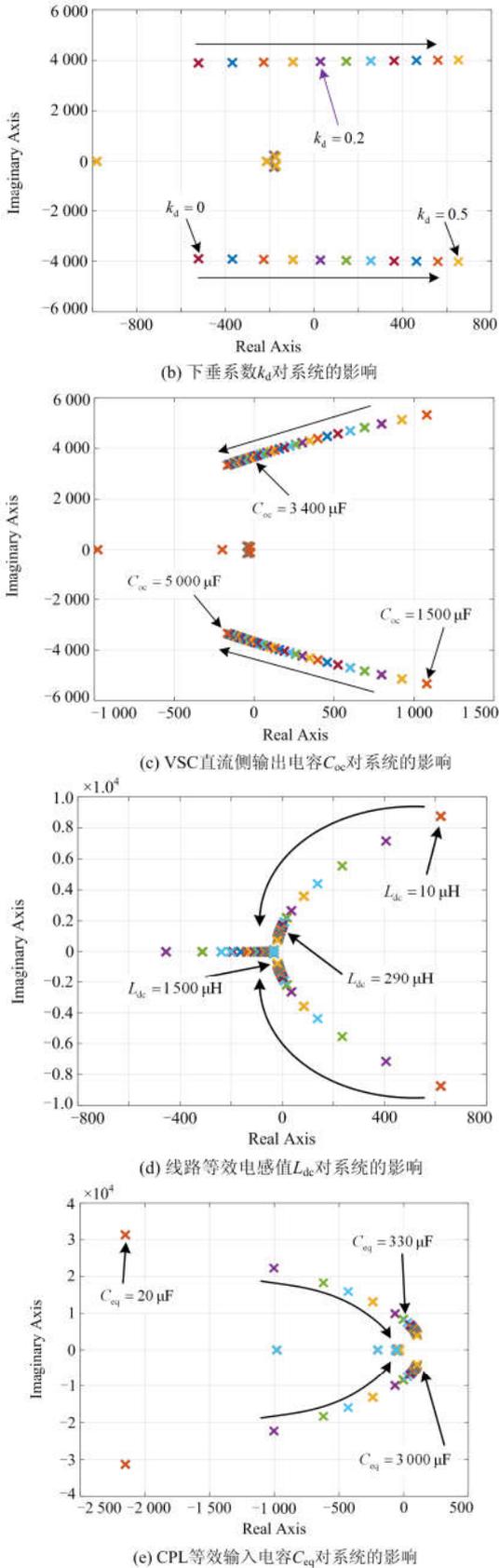


图6 系统特征根轨迹图

Fig. 6 Trace of the DC system eigenvalues

图6(a)为恒功率负载的功率 $P$ 从20 kW增加到50 kW时,系统的特征根轨迹。由图可知,系统临界功率为34 kW,系统稳定性会随着恒功率负载的功率增大而降低。在CPL功率为40 kW的工况下,增大下垂系数 $k_d$ 、VSC输出电容 $C_{oc}$ 、直流电感 $L_{dc}$ 及CPL等效输入电容,得到系统的特征根轨迹变化情况如图6(b)~图6(e)所示。由图6(b)可知,下垂系数 $k_d$ 增大,会使得系统的特征根向右半平面移动,降低系统稳定性。但是下垂系数过小,会影响源变换器之间的功率均分。由图6(c)可知,源变换器VSC输出电容 $C_{oc}$ 增大,可以提升系统稳定性。由图6(d)和图6(e)可知,增大直流电感 $L_{dc}$ 或减小CPL输入滤波电容 $C_{eq}$ ,也可以增加系统阻尼,提高稳定性。

### 3 虚拟阻容性阻抗方法

由上述分析可知,增大VSC的输出电容 $C_{oc}$ ,可以提升系统的稳定性,但是增大电容,会导致装置成本和体积的增加。对此,本文在下垂控制的基础上,提出了一种虚拟阻容性阻抗控制方法,调节原下垂控制对应的虚拟电阻,并增大VSC直流端口的容性阻抗,校正电压控制带宽外的负阻抗,抑制直流系统的振荡。对比VSC所采用输出电流下垂的控制方式,可以得出所提虚拟阻容性阻抗控制方法的等效电路图如图7所示。

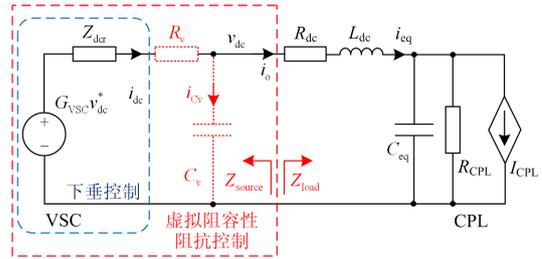


图7 直流电压下垂与虚拟阻容性阻抗控制等效电路图  
Fig. 7 Equivalent circuit of droop control and virtual capacitive resistance impedance control

图7中 $C_v$ 为加入的虚拟电容, $R_v$ 为所提控制所引入的等效虚拟电阻。 $i_{dc}$ 为图7中未经虚拟阻容性阻抗滤波器前的电流, $i_{Cv}$ 为图7中虚拟电容上流过的电流。虚拟电容输出的功率满足

$$i_{dc}v_{dc} - i_o v_{dc} = C_v v_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} \quad (18)$$

所提方法引入了容性阻抗 $C_v$ ,既提升直流系统稳定性,又可增强母线电压的惯性。进一步,可以将图7中的 $R_v$ 与 $C_v$ 等效为一个低通滤波器,为便于参数整定,可仅以该低通滤波器的截止频率 $\omega_c$



法后, 系统特性曲线不包围(-1, 0)点, 系统稳定。最后, 在单源单负载工况下, 系统随着功率变化时的特征根轨迹如图 13 所示。可知, 采用所提控制方法后, 系统的主导特征根均在  $s$  域左半平面, 系统稳定。

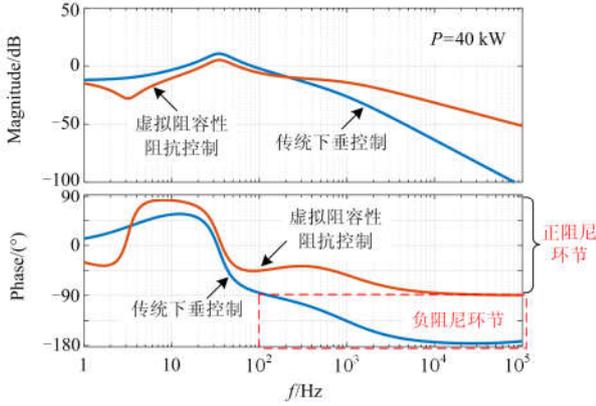


图 11 采用所提方法前后输出阻抗  $Z_{source}$  的 Bode 图

Fig. 11 Bode plot of  $Z_{source}$  without and with proposed approach

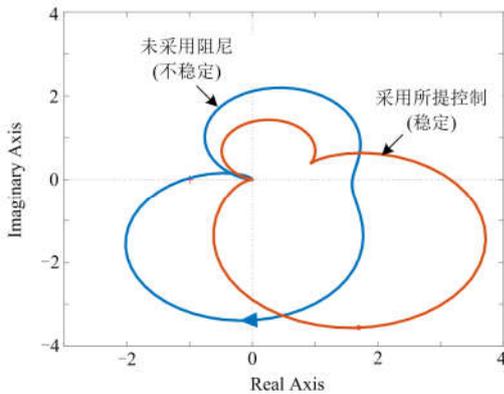


图 12 系统采用所提控制方法前后  $T$  的 Nyquist 图

Fig. 12 Nyquist plot of  $T$  without and with proposed approach

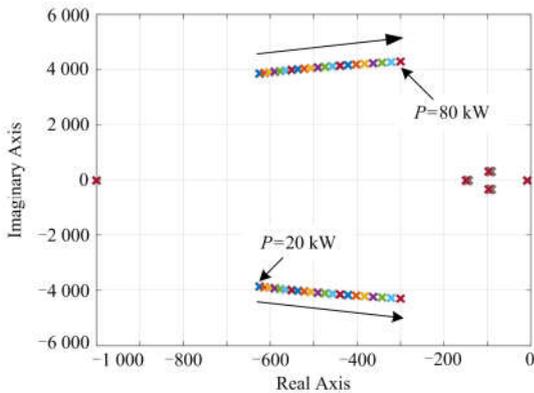


图 13 采用所提控制方法后系统特征根轨迹图

Fig. 13 Eigenvalues of DC system with proposed approach

#### 4 多源工况下的系统稳定性分析

多台 VSC 接入, 即多源共同运行时, 源变换器之间可按照式(25)进行电流均分, 可以近似认为 VSC 之间的输出电流是相等的。

$$I_{o,1} : I_{o,2} : \dots : I_{o,n} = \frac{1}{k_{d,1}} : \frac{1}{k_{d,2}} : \dots : \frac{1}{k_{d,n}} \quad (25)$$

设共有  $n$  台 VSC 源变换器, 此时, VSC 输出电流的状态方程表达式为

$$s\Delta i_{o,j} = \frac{1}{L_c + nL_{eq}} \Delta u_{o,j} - \frac{R_c + nR_{eq}}{L_c + nL_{eq}} \Delta i_{o,j} - \frac{1}{L_c + nL_{eq}} \Delta u_{eq} \quad (26)$$

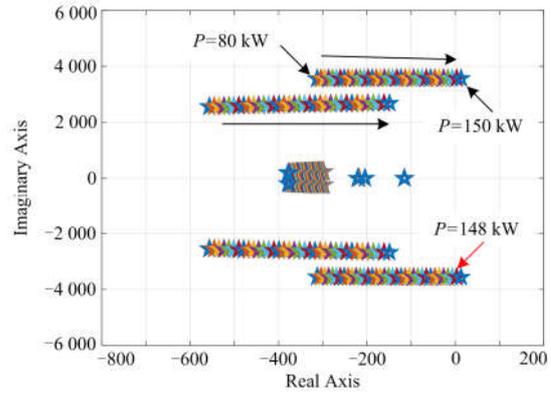


图 14 2 台 VSC 运行时的系统特征根轨迹图

Fig. 14 Eigenvalues of the DC system with 2 VSCs

为简化分析, 本文先以 2 台 VSC 同时运行为例, 研究系统稳定性, 设 VSC 之间的下垂系数相同, 均为 0.25。图 14 为恒功率负载的功率  $P$  从 80 kW 增加到 150 kW 时, 系统的特征根轨迹曲线。由图可知, 在其他参数不变的情况下, 相比单台运行时系统 34 kW 的临界功率, 2 台 VSC 并联运行的系统, 临界运行功率提升到 148 kW。故多源变换器并联时, 系统稳定性提升。

多个源变换器采用下垂控制接入系统时, 会使得各源变换器的输出阻抗并联, 此时系统等效电路如图 15 所示。

源侧子系统的输出阻抗  $Z_{sub}$  为

$$Z_{sub} = (Z_{source} + R_{e,1} + sL_{e,1}) // \dots // (Z_{source} + R_{e,n} + sL_{e,n}) \quad (27)$$

多源并联会使系统总输出阻抗幅值减小, 有利于系统稳定性的提升。同时, 采用所提的振荡抑制方法, 可以进一步提升系统的稳定性。

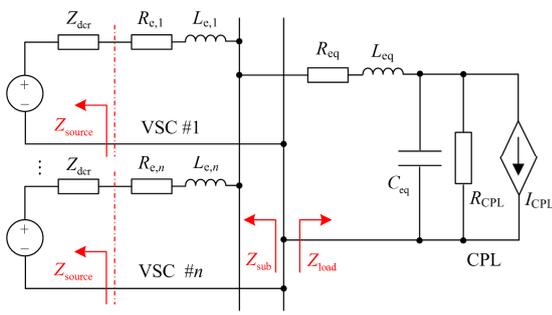


图 15 系统等效电路图

Fig. 15 Equivalent circuit of multiple VSCs and CPL

### 5 仿真验证

为了验证本文所提控制策略和分析方法的有效性, 搭建了图 1 所示的直流电网系统仿真平台, 包括 2 台 VSC 和 3 台 CPL, 系统参数如表 1 所示。其中的 CPL 采用降压 Buck 变换器进行等效仿真分析, Buck 变换器采用输出电压和电感电流双闭环控制, 其参数如表 2 所示。

表 2 Buck 变换器参数

Table 2 Parameters of the Buck converter

参数	数值
Buck 变换器额定输出功率	50 kW
Buck 变换器电流内环 PI 参数	$k_{p_i}=6, k_{i_i}=1\ 000$
Buck 变换器电压外环 PI 参数	$k_{p_v}=0.2, k_{i_v}=50$
Buck 负载变换器输出电压	300 V
Buck 负载变换器输出电感	0.5 mH
Buck 负载变换器输出滤波电容	470 $\mu$ F

工况一: 1 台 VSC 采用常规直流电压下垂控制直流母线电压, 并接入 1 号 CPL, 负载功率分别在 0.4 s 和 0.8 s 时提升。图 16 为工况一条件下的仿真波形。由图可知, 在 CPL 功率达到 50 kW, 超出临界功率后, 直流电压和电流均出现高频振荡, 振荡频率为 560 Hz, 与上文分析对应。

工况二: 接入 2 台采用常规直流电压下垂控制的 VSC, 直流系统分别在 0.3 s 时接入 50 kW 的 1 号 CPL, 在 0.6 s 时接入 50 kW 的 2 号 CPL, 以及 0.9 s 时接入 50 kW 的 3 号 CPL。2 台 VSC 的输出电压及电流高度重合, 在仿真图中用蓝线表示, CPL 的输入电压和总输入电流用绿线表示, 如图 17 所示。由图 17 可知, 在 2 台 VSC 同时运行的工况下, CPL 总功率达到 100 kW 时, 系统稳定; 但在 CPL 总功率达到 150 kW 时, 系统出现高频振荡。因此增加源变换器数量, 可以改善系统稳定性, 但随着功率增大, 系统仍然会振荡。

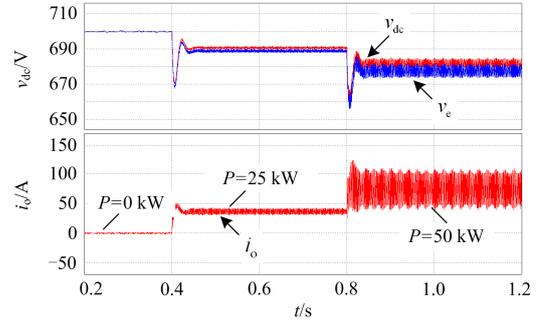


图 16 工况一电压和电流随功率变化波形

Fig. 16 DC voltage and current simulation results of working condition 1

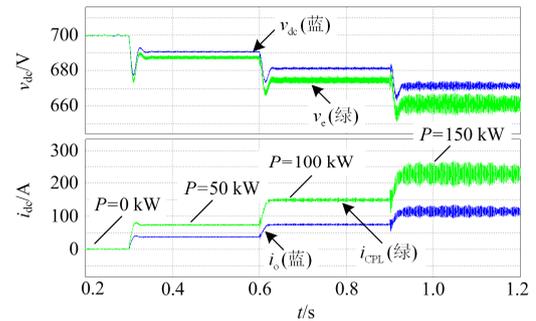


图 17 工况二电压和电流随功率参考值变化波形

Fig. 17 DC voltage and current simulation results of working condition 2

图 18 为 VSC 采用所提方法后, 直流电压与电流随 CPL 功率变化的情况。设电流参考值  $I_{set}$  为 0, 系统工况如下: 1 台 VSC, 接入 1 号 CPL, 在  $t=1$  s 时, 负荷功率  $P$  由 0 突增至 25 kW; 在  $t=3$  s, 负荷功率  $P$  由 30 突增至 50 kW; 在  $t=5$  s, 负荷功率  $P$  由 50 突减至 25 kW。由图 18 可知, 在 CPL 功率达到 50 kW 后, 原系统中的振荡得到抑制, 系统稳定性提升。同时, 所提控制方法可以使直流电压母线的动态变化变得平滑, 增强了直流系统的惯性。

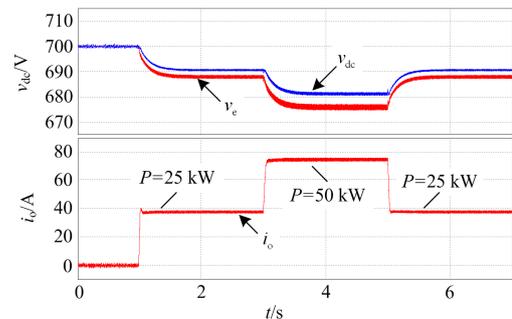


图 18 采用所提方法后, 电压和电流随功率参考值变化波形

Fig. 18 DC voltage and current simulation result of proposed approach with power variation

所提方法同样适用于多个 VSC 并联运行的直流电网系统。图 19 为 2 台 VSC 采用所提方法并联运行时,分别在 0.5 s 接入 50 kW 的 1 号 CPL,在 2 s 接入 50 kW 的 2 号 CPL,以及 3.5 s 时接入 50 kW 的 3 号 CPL,系统对应的电压和电流仿真波形。2 台 VSC 的输出电压及电流高度重合,在仿真图中用蓝线表示,CPL 的输入电压和总输入电流均用绿线表示,直流母线电压平稳无振荡。由图 19 可知,所提方法抑制了直流系统中的振荡,并增强了母线电压的惯性。

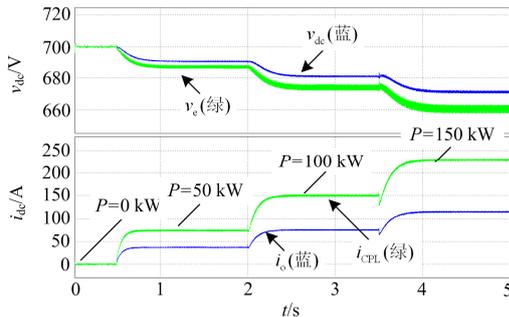


图 19 采用所提方法后,2 台 VSC 并联运行时系统电压和电流随功率参考值变化波形

Fig. 19 DC voltage and current simulation result of 2 VSCs parallel operation with proposed approach

## 6 结论

多个源变换器 VSC 采用直流电压下垂控制接入直流系统时,VSC 输出阻抗会与线路阻抗、恒功率负载产生阻抗交互,引起电压振荡。分析了系统的振荡机理及影响因素,并提出了虚拟阻容性阻抗提升系统稳定性的方法,得出以下结论:

1) 源变换器 VSC 采用常规直流电压下垂控制时,其输出阻抗会在电压环带宽外呈现负阻性。该负阻抗会与线路阻抗、负载输入电容及恒功率负载相互作用,引起直流系统振荡。

2) 增大负载功率和下垂系数,会降低系统稳定性。增大源变换器 VSC 输出电容和直流电感或减小恒功率负载输入滤波电容,也可以增加系统阻尼,提高稳定性。

3) 所提虚拟阻容性阻抗控制方法,可以校正源变换器的输出阻抗,使得 VSC 在电压控制带宽外保持较大的正阻尼,抑制直流侧振荡。由于容性阻抗的引入,所提方法抑制系统振荡的同时可以增强系统的惯性,提升母线电压抗负载波动的能力。

## 参考文献

[1] 冯悻彬,汪科,葛晓慧,等. 交直流混合微电网系统设

计与控制架构分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 143-150.

FENG Yibin, WANG Ke, GE Xiaohui, et al. System design and control framework analysis of hybrid AC-DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 143-150.

[2] 王琛,孟建辉,王毅,等. 含多种分布式电源的直流微电网硬件在环仿真系统设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 146-154.

WANG Chen, MENG Jianhui, WANG Yi, et al. Design and implementation of hardware in-the-loop simulation system for DC microgrid with multiple DG units[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 146-154.

[3] 田龙刚. 直流微电网电压等级的选择及其稳定控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 21-26.

TIAN Longgang. Research on the voltage level selection and its stability control strategy of DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 21-26.

[4] GAO F, BOZHKO S, COSTABEBER A, et al. Comparative stability analysis of droop control approaches in voltage-source-converter-based DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 32(3): 2395-2415.

[5] CUPELLI M, PONCI F, SULLIGOI G, et al. Power flow control and network stability in an all-electric ship[J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 103(12): 2355-2380.

[6] 李敬如,韩丰,姜世公,等. 能源互联网环境下交直流混合配电系统关键技术[J]. 中国电力, 2018, 51(8): 56-63.

LI Jingru, HAN Feng, JIANG Shigong, et al. Research on the key technologies of AC/DC hybrid distribution networks based on energy internet[J]. Electric Power, 2018, 51(8): 56-63.

[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): 84-97.

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.

[8] WU M, LU D. A novel stabilization method of LC input filter with constant power loads without load performance compromise in DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(7): 4552-4562.

[9] 滕昌鹏,王玉斌,周博恺,等. 含恒功率负载的直流微电网大信号稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 973-982.

- TENG Changpeng, WANG Yubin, ZHOU Bokai, et al. large-signal stability analysis of DC microgrid with constant power loads[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 973-982.
- [10] 朱永强, 唐萁. 交直流混合微电网可靠性影响因素分析[J]. 智慧电力, 2018, 46(4): 11-15.  
ZHU Yongqiang, TANG Qi. Analysis of factors affecting reliability of hybrid AC/DC microgrid[J]. Smart Power, 2018, 46(4): 11-15.
- [11] MIDDLEBROOK R. Input filter considerations in design and application of switching regulators[J]. IAS, 1976.
- [12] 黄旭程, 何志兴, 伍文华, 等. 交直流微电网中变换器级联系统稳定性分析与协同控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1432-1442.  
HUANG Xucheng, HE Zhixing, WU Wenhua, et al. Stability analysis of converters cascade system in the hybrid AC/DC microgrid and coordinative control[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1432-1442.
- [13] RADWAN A, MOHAMED A. Linear active stabilization of converter-dominated DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 203-216.
- [14] LI Y, TANG G, GE J, et al. Modeling and damping control of modular multilevel converter based DC grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 33(1): 723-735.
- [15] 季宇, 王东旭, 吴红斌, 等. 提高直流微电网稳定性的有源阻尼方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(2): 370-379.  
JI Yu, WANG Dongxu, WU Hongbin, et al. The active damping method for improving the stability of DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(2): 370-379.
- [16] LU X, SUN K, GUERRERO J, et al. Stability enhancement based on virtual impedance for DC microgrids with constant power loads[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(6): 2770-2783.
- [17] CESPEDAS M, XING L, SUN J. Constant-power load system stabilization by passive damping[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(7): 1832-1836.
- [18] ZHANG X, ZHONG Q, MING W. A virtual RLC damper to stabilize DC/DC converters having an LC input filter while improving the filter performance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(12): 8017-8023.
- [19] 刘宁宁, 曹炜, 赵晋斌. 直流微电网的一种增量式下垂控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 24-30.  
LIU Ningning, CAO Wei, ZHAO Jinbin. An incremental droop control method for DC micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 24-30.
- [20] GUO L, ZHANG S, LI X, et al. Stability analysis and damping enhancement based on frequency-dependent virtual impedance for DC microgrids[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(1): 338-350.
- [21] 伍文华, 陈燕东, 罗安, 等. 海岛 VSC-HVDC 输电系统直流阻抗建模、振荡分析与抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4359-4368.  
WU Wenhua, CHEN Yandong, LUO An, et al. DC impedance modeling, oscillation analysis and suppression method for VSC-HVDC system in the field of islands power supply[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4359-4368.
- [22] 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): 158-167.  
ZHU Xiaorong, XIE Zhiyun, JING Shuzhi. Virtual inertia control and stability analysis of DC micro-grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 158-167.
- [23] 王毅, 黑阳, 付媛, 等. 基于变下垂系数的直流配电网自适应虚拟惯性控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 116-124.  
WANG Yi, HEI Yang, FU Yuan, et al. Adaptive virtual inertia control of DC distribution network based on variable droop coefficient[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 116-124.
- [24] 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.

收稿日期: 2019-05-13

作者简介:

黄旭程(1992—), 男, 博士研究生, 研究方向为直流微电网运行与控制, 电能质量治理; E-mail: 727521506@qq.com

何志兴(1989—), 男, 通信作者, 副教授, 主要从事高频直流变换与多电平变换器的研究; E-mail: hezhixingmail@163.com

罗安(1957—), 男, 中国工程院院士, 博士生导师, 研究方向为电能变换与控制技术。

(编辑 周金梅)