

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191098

## 基于虚拟惯量的 DC 换流器并联直流配电网控制策略

聂永刚<sup>1</sup>, 李俊青<sup>1</sup>, 韩爽<sup>1</sup>, 郑鑫<sup>2</sup>, 张文涛<sup>2</sup>, 李霞林<sup>3</sup>, 郭力<sup>3</sup>

(1. 内蒙古电力(集团)有限责任公司培训中心, 内蒙古 呼和浩特 010010;

2. 内蒙古电力集团综合能源有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010020;

3. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

**摘要:** 直流配电系统中电源或者负荷大多通过 DC 变换器接入系统, 其负阻尼特性会导致系统振荡甚至诱发失稳, 直流配电系统的稳定性面临着越来越多的挑战。基于动态导纳建模方法, 建立了含多台 DC 换流器的直流配电系统小扰动稳定模型。基于奈奎斯特稳定判据, 分析了并联 DC 台数、直流配电线路等因素对稳定性的影响。提出了基于虚拟惯量的 DC 换流器分散控制策略, 在不改变平衡运行点的基础上, 有效提高了多 DC 换流器并联的稳定性。最后通过时域仿真验证了所提策略的有效性和正确性。

**关键词:** 海岛微电网; 蓄电池; 柴油发电机; 协同控制

### Virtual inertia-based control strategy for a multi parallel DC converter in a DC distribution system

NIE Yonggang<sup>1</sup>, LI Junqing<sup>1</sup>, HAN Shuang<sup>1</sup>, ZHENG Xin<sup>2</sup>, ZHANG Wentao<sup>2</sup>, LI Xiaolin<sup>3</sup>, GUO Li<sup>3</sup>

(1. Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., Ltd. Training Center, Hohhot 010010, China;

2. Inner Mongolia Power Group Synthesis Energy Co., Ltd., Hohhot 010020, China;

3. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Most sources or loads are integrated into a DC distribution system through a DC converter, but the negative damping of a DC converter will lead to system oscillation and even instability. The stability of DC distribution systems is facing increasing challenges. Based on the dynamic admittance modelling method, a small disturbance stability model of a DC distribution system with multiple DC converters is established. The influence of the number of parallel DC converters and DC distribution lines on the stability is analyzed by the Nyquist stability criterion. A decentralized virtual inertia control strategy for DC converters is proposed. It can effectively improve the DC distribution system stability with multi parallel DC converters without changing the equilibrium point. Finally, the validity and correctness of the proposed strategy are verified by time domain simulation.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51977142).

**Key words:** islanded microgrid; battery; diesel generator; combined control

## 0 引言

近年来, 随着光伏、电动汽车等直流源荷的快速发展, 交流配电系统在运行控制方面面临着越来越多的挑战。直流配电系统具有线损小、控制简单以及隔离故障迅速等优势, 已成为目前电力发展的一个重要方向<sup>[1-2]</sup>。但直流配电系统缺少发电机等旋

转设备, 是一个典型的电力电子主导的低惯量系统, 直流电源或者负荷大多通过 DC 变换器接入系统, 其负阻尼特性会导致系统振荡甚至诱发失稳。

目前, 如何提高直流源荷接入的直流配电系统稳定性已成为一个研究热点。文献[3]为了抑制分布式发电中功率变换模块的双级式功率变换器存在的暂态直流母线电压冲击和波动的问题, 提出了一种基于功率平衡和时滞补偿相结合的前馈补偿方法。文献[4]提出了一种虚拟同步发电机的控制方法, 并将其应用在双向 DC-DC 中, 该方法提高了直流微电网的惯性, 抑制住了直流母线的电压波动。文

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目资助(51977142)“互联多微电网的中压柔性直流配电系统灵活功率控制与稳定性研究”

献[5]考虑分布式发电的随机性和间歇性是造成配电网母线电压波动的重要因素,针对这一问题,提出了一种有功无功协调控制策略,通过控制换流器的输出功率来调整电压稳定。文献[6]考虑到高渗透率的分布式电源并网会造成系统功率振荡,提出了基于“一点定电压、多点下垂”的协调控制方法。将分布式能源和储能组成一个功率可控元,共同参与功率的协调控制。文献[7]提出一种阻性虚拟阻抗和补偿虚拟阻抗相结合的下垂控制策略,阻性虚拟阻抗用于直流微电网稳态时的功率分配,补偿虚拟阻抗主要作用为提升系统动态性能。文献[8]针对直流微电网惯性低以及风电机组虚拟惯性不足易于造成电压波动的问题,提出了一种基于直流微电网的协调虚拟惯量控制策略,以提高整个系统的惯性。文献[9]利用特征值分析了影响直流微电网稳定性的因素,提出了一种基于频率特性的虚拟阻抗方法,通过形成直流母线电压控制单元的高频阻抗,提高系统的整体稳定性。文献[10]针对线路等效电抗与换流器的稳压电容构成低阻尼 LC 环节与换流器的输出阻抗相互作用,引发高频振荡,提出一种基于阻抗匹配准则的有源阻尼方法,改变换流器的等效输出阻抗,增强系统阻尼。

文献[11]考虑传统微电网中存在的恒功率负载增量电阻,通过 LC 输入滤波环节降低了系统的稳定裕度。针对这一问题,通过在换流器源侧增加一个虚电阻,来降低换流器的输出阻抗,进而增强系统的稳定性。文献[12]利用阻抗匹配准则揭示了恒功率负载引起系统不稳定的问题,提出了一种基于下垂控制方法的虚拟阻抗的稳定控制器。文献[13]针对直流微电网中母线电压易受可再生能源以及负荷扰动影响的问题,提出了一种虚拟直流电机控制直流微网储能换流器,实现了换流器与母线电压的灵活连接,有效抑制直流母线电压波动,提高了系统稳定性。文献[14]提出了一种基于双象限荷电状态的分布式储能下垂控制方法,并将下垂控制作为一种分散控制方法,逐步均衡输入/输出功率,以实现直流微电网的合理功率分配。文献[15]分析了多台 DC-DC 换流器构成的直流微电网失稳的原因,通过雅可比矩阵得到系统稳定的充分条件,与传统的方法相比,具有较大的稳定裕度。

上述研究在稳定分析或者控制方面做了部分探讨,但针对多台 DC 换流器接入直流配电系统的稳定控制方面,尚需进一步研究。为此,针对该问题本文主要开展了以下研究工作:

1) 基于动态导纳建模方法,建立了含多台 DC 换流器的直流配电系统小扰动稳定模型,该方法采

用频域导纳模型,易于实现并联元件的建模;

2) 基于奈奎斯特稳定判据,分析了直流配电线路、并联 DC 台数、DC 换流器功率变化等因素对稳定性的影响,可以定性获取影响系统稳定的关键因素;

3) 提出了基于虚拟惯量的 DC 换流器分散控制策略,在不改变运行点的基础上,有效提高了多 DC 换流器并联的稳定性;

4) 建立了时域仿真模型,通过仿真测试验证了本文所提策略的有效性和正确性。

## 1 直流配电系统小扰动模型

图 1 给出了一个典型的两端直流配电系统结构,交流配电系统通过 VSC(Voltage Source Converter)换流器与直流配电系统相连,采用下垂控制实现两端功率均分。终端负荷等一般通过 DC 换流器接入系统,一般采用恒功率控制。下文将针对 VSC 换流器、DC 换流器以及直流线路等关键设备进行频域动态导纳建模。

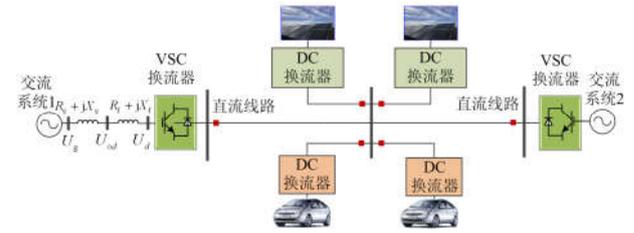


图 1 两端直流配电结构拓扑图

Fig. 1 Topology of two-terminal DC distribution system

### 1.1 VSC 换流器

换流器采用  $P-U_{dc}$  下垂控制,式(1)给出了有功功率与直流电压的关系。

$$U_{dc} = \begin{cases} k_p(P - P_{ref}) + U_{dcref} & U_{dcmin} < U_{dc} < U_{dcmax} \\ U_{dcmax} & U \geq U_{dcmax} \\ U_{dcmin} & U \leq U_{dcmin} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P$  为换流器输出有功功率;  $k_p$  为下垂系数;  $U_{dcref}$  为直流电压参考值;  $U_{dc}$  为换流器连接的直流母线电压;  $P_{ref}$  为有功功率参考值;  $U_{dcmax}$  为换流器直流电压上限;  $U_{dcmin}$  为换流器直流电压下限。

忽略换流器损耗,  $dq$  坐标系下换流器交流侧的有功功率  $P$  可表示为

$$P = 1.5(U_d I_d + U_q I_q) = U_{dc} I_{dc} \quad (2)$$

对式(2)施加小扰动,可得:

$$U_{dc(0)} \Delta I_{dc} + I_{dc(0)} \Delta U_{dc} = 1.5(U_{d(0)} \Delta I_d + I_{d(0)} \Delta U_d + U_{q(0)} \Delta I_q + I_{q(0)} \Delta U_q) \quad (3)$$

以图 1 中交流系统 1 为例,  $dq$  坐标系下电压和

电流动态特性如式(4)~式(6)所示<sup>[16-20]</sup>。

$$U_d - U_{od} = I_d (R_f + sL_f) - \omega L_f I_q \quad (4)$$

$$I_d - I_{od} = sC_f U_{od} - \omega C_f U_{oq} \quad (5)$$

$$I_{od} = \frac{U_{od} - U_{gd}}{R_g + sL_g} \quad (6)$$

式中:  $U_d$  和  $I_d$  分别为换流器输出的交流电压和电流在  $dq$  轴上的分量;  $U_{od}$  和  $I_{od}$  分别为交流母线电压和注入电流在  $dq$  轴上的分量;  $R_f$ 、 $C_f$ 、 $L_f$  分别为线路的电阻、电容和电感;  $\omega$  为交流电压角频率;  $s$  为拉普拉斯算子;  $U_{gd}$  为交流配电网母线电压在  $d$  轴上的分量;  $R_g$  和  $L_g$  分别为交流配电系统的电阻和电感。

对式(4)~式(6)施加小扰动, 可得:

$$\Delta Y_{ac} = \frac{1.5 \left( \left( sC_f + \frac{1}{R_g + sL_g} \right) \left( U_{d(0)} + I_{d(0)} (R_f + sL_f) \right) + I_{d(0)} \left( \frac{U_{d(0)}}{U_{dc(0)}} + G_p(s) G_i(s) \right) \right)}{U_{ac(0)} \left( \left( sC_f + \frac{1}{R_g + sL_g} \right) (R_f + sL_f + G_i(s)) + 1.5k_p G_p(s) G_i(s) \left( sC_f + \frac{1}{R_g + sL_g} \right) \left( U_{d(0)} + I_{d(0)} (R_f + sL_f) \right) + I_{d(0)} \right) + 1} - \frac{I_{dc(0)}}{U_{dc(0)}} \quad (10)$$

## 1.2 DC 换流器

多台 DC 换流器并联时, 其动态导纳为

$$\Delta Y_{DCs} = \Delta Y_{DC1} + \Delta Y_{DC2} + \Delta Y_{DC3} + \dots \quad (11)$$

首先推导单台 DC 换流器动态模型, 忽略斩波器的功率损耗, DC/DC 换流器的功率可表示为

$$P = U_{dc1} I_{dc1} = U_{dc2} I_{dc2} \quad (12)$$

从 DC/DC 换流器流出的直流电流  $I_{dc2}$  可表示为

$$I_{dc2} = \frac{U_{dc2} - U_b}{R + sL} \quad (13)$$

式中:  $U_{dc1}$  和  $U_{dc2}$  分别为斩波器入口处电压和斩波器出口处电压;  $I_{dc1}$  为从直流母线注入到斩波器的直流电流;  $U_b$  为模拟直流源电压;  $R$  和  $L$  分别电动汽车动力电池斩波器之间的直流线路电阻和电抗。

DC/DC 换流器控制采用传统恒功率控制, 功率外环与电流内环控制环节如式(14)和式(15)所示。

$$\alpha = (I_{dc2ref} - I_{dc2}) G_i(s) \quad (14)$$

$$I_{dc2ref} = (P_{dc2ref} - P_{dc2}) G_p(s) \quad (15)$$

其中:  $\alpha$  为斩波器调制解调信号;  $P_{dc2}$  和  $P_{dc2ref}$  分别为功率外环控制环节有功功率信号及其参考值,  $I_{dc2ref}$  和  $I_{dc2}$  分别为电流内环控制环节电流信号及其参考值。斩波器有功功率外环 PI 控制器可表示为  $G_p(s) = K_{pp} + K_{pi}/s$ , 电流内环控制环节的 PI 控制器可表示为  $G_i(s) = K_{pi} + K_{ii}/s$ 。

对式(12)做小扰动, 并忽略  $\Delta I_{dc1} \Delta U_{dc1}$  和  $\Delta I_{dc2} \Delta U_{dc2}$  等高次项, 可得:

$$\Delta U_d = \Delta U_{od} \left( 1 + (R_f + sL_f) \left( sC_f + \frac{1}{R_g + sL_g} \right) \right) \quad (7)$$

$P-U_{dc}$  下垂控制的电压外环和电流内环控制模型如式(8)、式(9)所示。

$$I_{dref} = \left[ U_{dc} - (U_{dc2ref} + k_p (P - P_{ref})) \right] \left( K_{pp} + \frac{K_{pi}}{s} \right) \quad (8)$$

$$P_{md} = (I_{dref} - I_d) \left( K_{ip} + \frac{K_{ii}}{s} \right) \quad (9)$$

式中:  $I_{dref}$  为  $d$  轴电流信号参考值;  $P_{md}$  为换流器调制信号在  $d$  上的分量;  $K_{pp}$  和  $K_{pi}$  分别为外环比例和积分系数;  $K_{ip}$  和  $K_{ii}$  分别为内环比例和积分系数。

联立式(3)以及式(7)~式(9), 可得如式(10)所示动态导纳。

$$\Delta P = U_{dc1(0)} \Delta I_{dc1} + \Delta U_{dc1} I_{dc1(0)} = U_{dc2(0)} \Delta I_{dc2} + \Delta U_{dc2} I_{dc2(0)} \quad (16)$$

对式(12)做小扰动, 并忽略  $\Delta I_{dc1} \Delta U_{dc1}$  和  $\Delta I_{dc2} \Delta U_{dc2}$  等高次项, 可得:

其中,  $\Delta$  为稳定运行点处的偏移量, 下标“(0)”为稳定运行点数值。

对式(13)作小扰动并立可得式(17):

$$\Delta I_{dc2} = \frac{\Delta U_{dc2}}{R + sL} \quad (17)$$

联立式(16)和式(17)可得:

$$U_{dc1(0)} \Delta I_{dc1} + \Delta U_{dc1} I_{dc1(0)} = \Delta U_{dc2} \left( I_{dc2(0)} + \frac{U_{dc2(0)}}{R + sL} \right) \quad (18)$$

对式(14)和式(15)做小扰动并立可得式(17)和式(18)可得 DCDC 换流器小信号导纳模型  $\Delta Y_{dcp}$ , 如式(19)所示。

$$\Delta Y_{dc} = \frac{\left( I_{dc2(0)} + \frac{U_{dc2(0)}}{R + sL} \right) \frac{U_{dc2(0)}}{U_{dc1(0)}}}{U_{dc1(0)} \left( \left( I_{dc2(0)} + \frac{U_{dc2(0)}}{R + sL} \right) G_p(s) G_i(s) + \frac{G_i(s)}{R + sL} + 1 \right)} - \frac{I_{dc1(0)}}{U_{dc1(0)}} \quad (19)$$

## 1.3 直流线路模型

采用  $\pi$  型集总参数等值电路, 其小扰动模型如式(20)所示, 其中,  $R$  为线路电阻,  $L$  为线路电抗,  $s$  为拉普拉斯算子。

$$\Delta Y = \frac{1}{R + sL} \quad (20)$$

## 2 稳定性分析

奈奎斯特稳定判据采用阻抗比是否包围(-1,0)点判断系统稳定性<sup>[20-26]</sup>，但对于并联设备阻抗计算较为复杂，为此本文采用基于导纳比的奈奎斯特判据，即负荷侧导纳与电源侧导纳比的奈奎斯特曲线不包含(-1, j0)，则判定系统稳定，否则判定系统失稳。下文将采用该方法分析 DC 换流器并联台数、DC 换流器功率变化以及直流线路参数对稳定性的影响。

### 2.1 DC 换流器并联台数

系统分别并联 1、2、3、4 台 DC 换流器时，系统奈奎斯特曲线如图 2 所示。

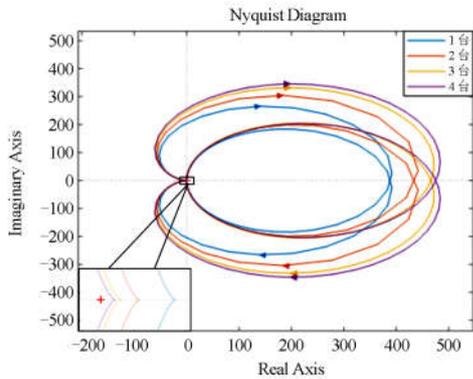


图 2 并联 DC 换流器台数变化时奈奎斯特曲线  
Fig. 2 Nyquist curve when the number of parallel DC converters changes

由图 2 可知，随着并联 DC 换流器台数的增加，系统的奈奎斯特曲线与负实轴的交点距离点(-1, j0)的距离越来越远，即系统稳定性越来越差。

### 2.2 DC 换流器功率

DC 换流器功率增加 100%前后，系统奈奎斯特曲线如图 3 所示。

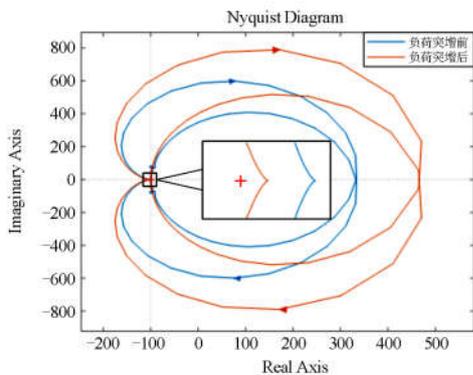


图 3 DC 换流器功率变化奈奎斯特曲线图  
Fig. 3 Nyquist curve diagram when the DC converters power changes

由图 3 可知，随着 DC 换流器功率的增加，系统的奈奎斯特曲线与负实轴的交点距离点(-1, j0)的距离越来越远，即系统稳定性越来越差。

### 2.3 线路参数变化

直流线路是直流配电网的重要组成部分，为研究线路参数变化对系统稳定性的影响，分别选取线路电阻值为 7 mΩ、9 mΩ、11 mΩ，奈奎斯特曲线如图 4 所示。

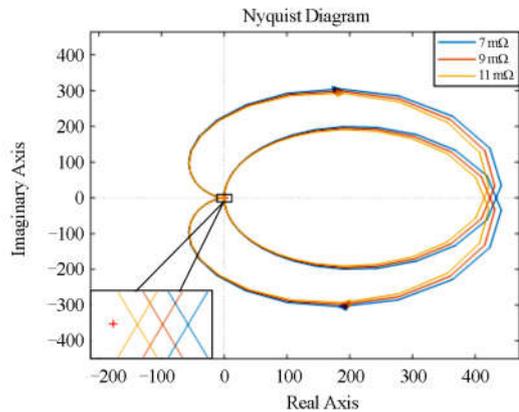


图 4 线路电阻参数变化奈奎斯特曲线图

Fig. 4 Nyquist curve diagram when the resistance inductance parameter changes

由图 4 可知，随着直流线路电阻值的增加，奈奎斯特曲线与负实轴的交点距离点(-1, j0)越来越远，系统稳定性变差。

直流线路电阻参数不变，选取线路电感参数为 0.22 mH、0.24 mH、0.26 mH，相应的奈奎斯特曲线如图 5 所示。

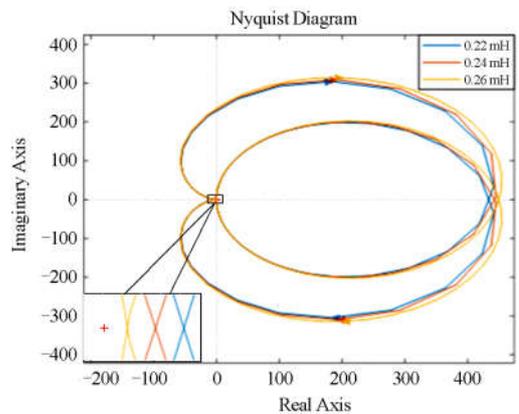


图 5 线路电感参数变化时奈奎斯特曲线图

Fig. 5 Nyquist curve diagram when the line inductance parameter changes

由图 5 可知，随着直流线路电感值的增加，奈奎斯特曲线与负实轴的交点距离点(-1, j0)越来越远，系统稳定性变差。

### 3 并联 DC 换流器分散控制策略

通过以上分析可以看出, 由于缺乏惯量支撑, 系统会产生不稳定现象, 为此, 本文提出如图 6 所示基于虚拟惯量的分散控制策略, 红色框内为各 DC 换流器虚拟惯量补偿环节, 采用并联需补偿结构对平衡点无任何影响, 在提高暂态稳定性能的同时, 能够保证系统的稳态运行状态。

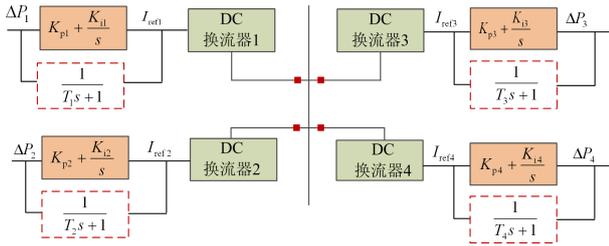


图 6 虚拟惯量分散控制策略

Fig. 6 Virtual inertia dispersion control

采用虚拟惯量控制的 DC 换流器小扰动模型如页面底部式(21)所示。下面将对其稳定性进行分析。

#### 3.1 DC 换流器并联合数增加

针对系统并联 4 台 DC 换流器工况, 引入虚拟惯量分散控制前后, 系统奈奎斯特曲线图如图 7 所示。

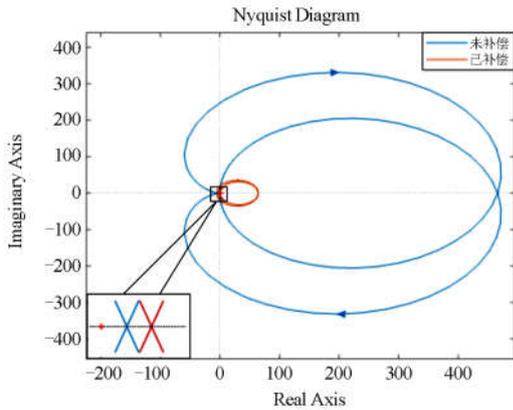


图 7 引入虚拟惯量分散控制前后奈奎斯特曲线

Fig. 7 Nyquist curve before and after virtual inertia dispersion control

由图 7 可知, 本文提出的虚拟惯量分散控制的奈奎斯特曲线与负实轴的交点距离点(-1, j0)更远, 因此补偿后的系统稳定性更好。

#### 3.2 DC 换流器功率增加

当 DC 换流器功率增加时, 引入虚拟惯量分散控制前后, 系统奈奎斯特曲线图如图 8 所示。

由图 8 可知, 针对 DC 换流器功率增加工况, 引入虚拟惯量分散控制后, 系统奈奎斯特曲线与负

实轴的交点距离点(-1, j0)更远, 因此补偿后的系统稳定性更好。

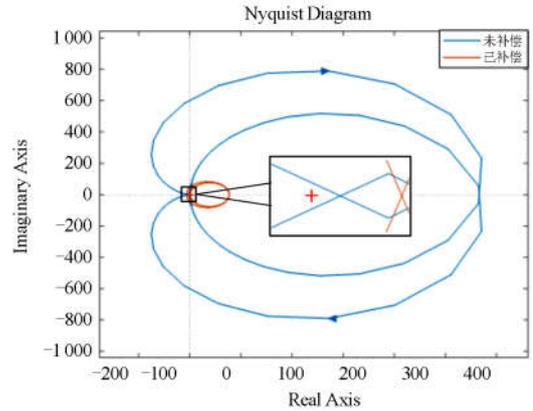


图 8 引入虚拟惯量分散控制前后奈奎斯特曲线

Fig. 8 Nyquist curve before and after virtual inertia dispersion control

DCDC 换流器的恒功率控制方式模型图如图 9 所示。图中  $U_{dc}$  为公共直流母线电压,  $G_c(s)=K/(T_s+1)$ , 当  $K=0$  时, 等同于未加补偿的常规恒功率控制, 当  $K=1$  时, 则为加补偿后的虚拟惯量分散控制, 其余变量与上文含义相同。

结合图 9 可得, 加入分散虚拟惯量函数后的开传递函数为

$$G_{po}(s) = \frac{(G_p(s) + G_c(s))G_i(s)}{(1 + G_i(s))}G_l(s) \quad (21)$$

由  $G_{po}(s)$  绘制加入虚拟惯量补偿前、后的开环 Bode 图如图 10 所示, 以此探讨加入虚拟惯量分散控制策略对稳定性的影响。

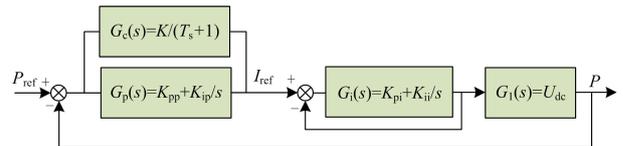


图 9 恒功率控制典型模型

Fig. 9 Model of constant power control

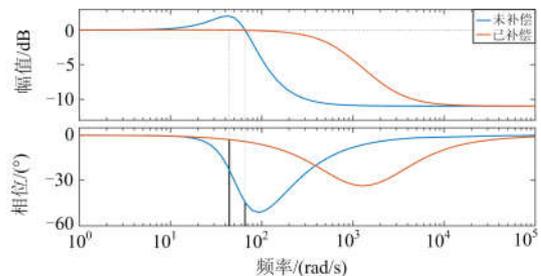


图 10 引入虚拟惯量分散控制前后 Bode 图

Fig. 10 Bode diagram before and after virtual inertia dispersion control

由图 10 可以看出,加入虚拟惯量分散控制后,相角裕量增加,稳定性提升,虚拟惯量分散控制减弱了 DC 换流器的负阻尼效应,增强了系统抗干扰。

### 3.3 T 参数变化

当虚拟惯性补偿函数中的 T 参数发生变化时,系统奈奎斯特曲线图如图 11 所示。

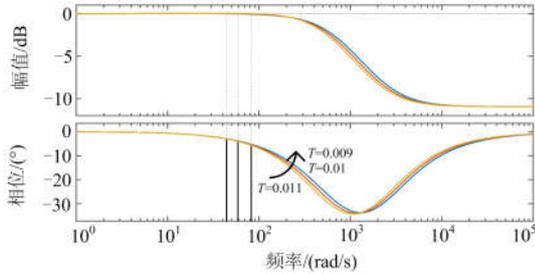


图 11 T 参数变化 Bode 图

Fig. 11 Bode diagram when the T parameter changes

由图 11 可知,随着 T 参数的减小,相角裕量不断增加,系统稳定性愈来愈强。

## 4 时域仿真验证

在 Digsilent 仿真软件中依照图 12 系统结构图搭建了典型的多 DC 换流器并联的直流配电系统仿真算例。分析了并联 DC 换流器台数、直流配电线路对系统稳定性的影响。所有工况下系统控制参数相同,具体控制参数如表 1 所示。

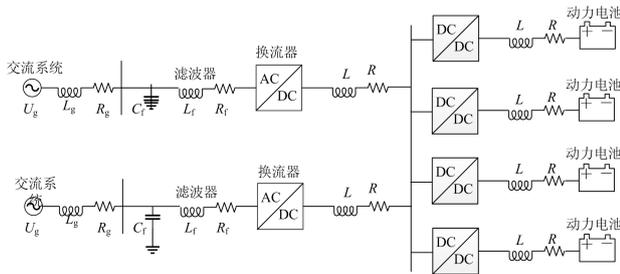


图 12 算例系统图

Fig. 12 System topology of example

表 1 系统控制参数

Table 1 System control parameter

控制方式	下垂系数	内环比例参数	内环积分参数	外环比例参数	外环积分参数
斩波器	—	0.2	20	0.55	55
恒功率	—	—	—	—	—
换流器控制	3	0.155	15.5	0.8	80

由于公共直流电压是衡量直流配电系统稳定性的重要指标,故选取公共直流母线电压做仿真图。

### 4.1 并联 DC 换流器台数

系统分别并联 1、2、3、4 台 DC 换流器时,系统公共母线电压仿真图如图 13 所示。

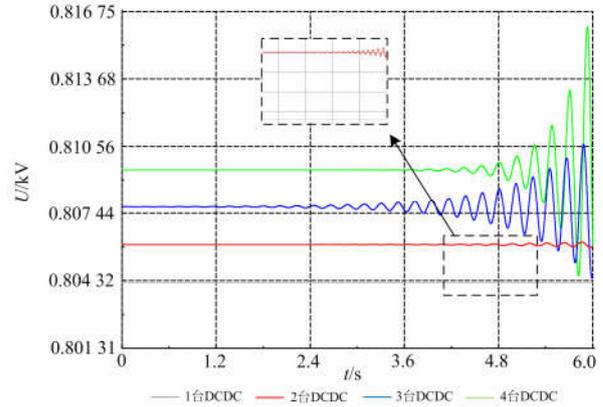


图 13 并联 1、2、3、4 台 DCDC 换流器时直流母线电压

Fig. 13 DC bus voltage when paralleling 1, 2, 3, 4 DCDC converters

由图 13 可知,随着 DCDC 换流器并联数量的增加,带来的负阻抗效应更加明显,而系统缺乏有效的惯性支撑,从而引起了系统失稳。

$$\Delta Y_{dc\_com} = \frac{\left( I_{dc2(0)} + \frac{U_{dc2(0)}}{R+sL} \right) \frac{U_{dc2(0)}}{U_{dc1(0)}}}{U_{dc1(0)} \left( \left( I_{dc2(0)} + \frac{U_{dc2(0)}}{R+sL} \right) \left( G_p(s) + \frac{1}{T_s+1} \right) G_i(s) + \frac{G_i(s)}{R+sL} + 1 \right)} \frac{I_{dc1(0)}}{U_{dc1(0)}} \quad (22)$$

### 4.2 4 台 DC 换流器

系统并联 4 台 DC 换流器时,引入虚拟惯量控制前后,系统公共母线电压仿真图如图 14 所示。

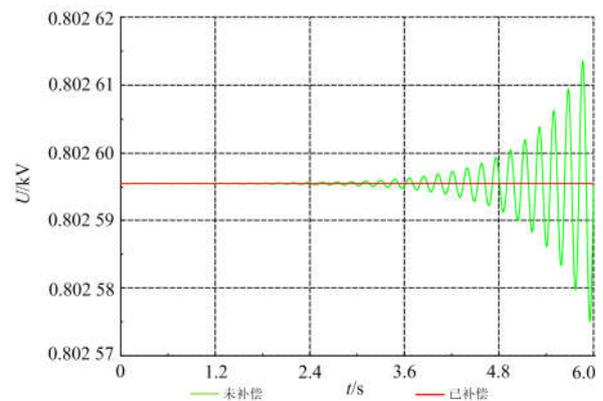


图 14 虚拟惯量补偿前后直流母线电压

Fig. 14 DC bus voltage before and after compensation

由图 14 可知,引入虚拟惯量控制后,增强了系统阻尼,有效中和了多 DC 换流器并联带来的负阻

抗效应, 增强了系统稳定性。

### 4.3 负荷扰动

系统发生 100% 负荷扰动, 系统公共母线电压仿真图如图 15 所示。

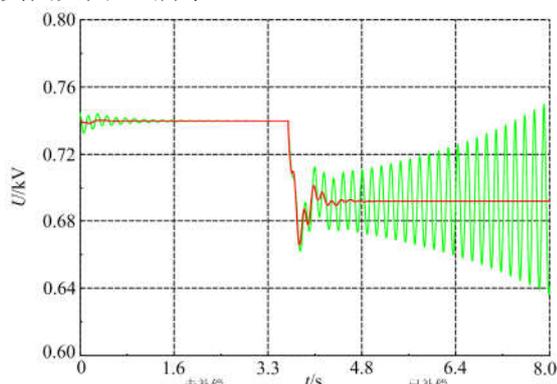


图 15 补偿前后直流母线电压

Fig. 15 DC bus voltage before and after compensation

由图 15 可知, 引入虚拟惯量控制后, 增强了系统阻尼, 缓冲负荷扰动对系统带来的负面影响, 增强了系统稳定性。

### 4.4 $T$ 参数变化

当  $T$  参数变化时, 系统公共母线电压仿真图如图 16 所示。

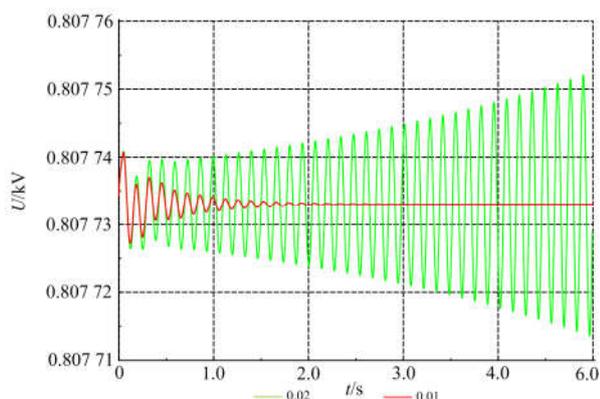


图 16 补偿前后直流母线电压

Fig. 16 DC bus voltage before and after compensation

由图 16 可知,  $T$  参数减小后, 使虚拟惯量补偿函数激发了更大的惯性, 增强了系统稳定性。

## 5 结论

本文针对多 DC 换流器并联的直流配电系统稳定性进行了研究, 提出了分散虚拟惯量控制以提高系统稳定性, 主要结论如下:

1) 直流配电线路参数的变化会对系统稳定性产生影响, 随着电阻以及电感的增大, 系统稳定性变差。

2) DC 换流器的负阻尼特性易导致系统失稳, 且随着并联合数增加, 系统稳定性逐渐减弱。

3) DC 换流器功率的增加使 DC 换流器的负阻尼特性更加明显, 随着 DC 换流器功率的增大, 系统稳定性变差。

4) DC 换流器功率的增加使得 DC 换流器的负阻尼特性更加明显, 随着功率的增加, 系统稳定性逐渐减弱。

5) 通过对各 DC 换流器就地增加分散式虚拟惯量, 可以有效提高系统阻尼, 提升系统稳定性, 理论分析以及仿真测试均验证了所提策略的有效性。

## 参考文献

- [1] 孙鹏飞, 贺春光, 邵华, 等. 直流配电网研究现状与发展[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 64-73.  
SUN Pengfei, HE Chunguang, SHAO Hua, et al. Research status and development of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 64-73.
- [2] RAHMAN M H, XU Lie, YAO Liangzhong. Protection of large partitioned MTDC networks using DC-DC converters and circuit breakers[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 170-178. DOI: 10.1186/S41601-016-0030-0.
- [3] 王成山, 李霞林, 郭力. 基于功率平衡及时滞补偿相结合的双级式变流器协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 109-117.  
WANG Chengshan, LI Xialin, GUO Li. Coordinated control of two-stage power converters based on power balancing and time-delay compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 109-117.
- [4] 朱晓荣, 孟凡奇, 谢志云. 基于虚拟同步发电机的直流微网 DC-DC 变换器控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21): 132-140.  
ZHU Xiaorong, MENG Fanqi, XIE Zhiyun. Control strategy of DC-DC converter in DC microgrid based on virtual synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 132-140.
- [5] 刘嘉彦, 李勇, 曹一家, 等. 考虑光伏利用效率的中低压配电网电压抬升抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 171-177, 248-250.  
LIU Jiayan, LI Yong, CAO Yijia, et al. Suppression method of voltage rise in medium and low distribution networks considering utilization efficiency of photovoltaic power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 171-177, 248-250.
- [6] 马骏超, 江全元, 赵宇明. 直流配电网定电压-下垂协调控制策略研究[J]. 供用电, 2015, 32(10): 15-25.  
MA Junchao, JIANG Quanyuan, ZHAO Yuming. A coordinated control method based on voltage control and droop control for medium-voltage DC distribution systems[J]. Distribution & Utilization, 2015, 32(10): 15-25.
- [7] 支娜, 张辉, 肖曦. 提高直流微电网动态特性的改进下垂控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2016, 21(3): 31-39.

- ZHI Na, ZHANG Hui, XIAO Xi. Research on the Improved droop control strategy for improving the dynamic characteristics of DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 21(3): 31-39.
- [8] 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 micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 49-58.
- [9] GUO Li, ZHANG Shaohui, LI Xialin, et al. Stability analysis and damping enhancement based on frequency-dependent virtual impedance for DC microgrids[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(1): 338-350.
- [10] 郭力, 冯恽彬, 李霞林, 等. 直流微电网稳定性分析及阻尼控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 927-936.
- GUO Li, FENG Yibin, LI Xialin, et al. Stability analysis and research of active damping method for DC microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 927-936.
- [11] WU M F, DYLAN D C L. 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.
- [12] 彭忠, 魏金科, 赵静, 等. 并联型多端直流输电系统运行方式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 180-187.
- PENG Zhong, WEI Jinke, ZHAO Jing, et al. Operation mode research on parallel multi-terminal HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 180-187.
- [13] LU X N, SUN K, GUERRERO J M, 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.
- [14] TAN S C, DONG G, ZHANG H, et al. Virtual DC machine control strategy of energy storage converter in DC microgrid[C] // 2016 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), October 12-14, 2016, Ottawa, ON, Canada: 1-5.
- [15] 萧展辉, 蔡微, 黄剑文, 等. MMC 型多端柔性直流配电系统协同控制与故障电流抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 103-110.
- XIAO Zhanhui, CAI Wei, HUANG Jianwen, et al. Coordinate control scheme for modular multilevel converter based multi-terminal DC distribution power systems and circuit suppression during faults[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 103-110.
- [16] LU X N, SUN K, JOSEP M, et al. Double-quadrant state-of-charge-based droop control method for distributed energy storage systems in autonomous DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1): 147-157.
- [17] SU M, LIU Z J, SUN Y, et al. Stability analysis and stabilization methods of DC microgrid with multiple parallel-connected DC-DC converters loaded by CPLs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(1): 132-142.
- [18] AMR A A R, YASSER A I M. Assessment and mitigation of interaction dynamics in hybrid AC/DC distribution generation systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1382-1393.
- [19] 李国庆, 王浩翔, 王振浩, 等. 含直流潮流控制器的交直流混合系统多目标最优潮流研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 124-132.
- LI Guoqing, WANG Haoxiang, WANG Zhenhao, et al. Study of multi-objective optimal power flow of AC-DC hybrid system with DC power flow controller[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 124-132.
- [20] 李霞林, 张雪松, 郭力, 等. 双极性直流微电网中多电压平衡器协调控制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(4): 721-729.
- LI Xialin, ZHANG Xuesong, GUO Li, et al. Coordinated control of multiple voltage balancers in a bipolar DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(4): 721-729.
- [21] LI X L, GUO L, ZHANG S H, et al. Observer-based DC voltage droop and current feed-forward control of a DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 5207-5216.
- [22] ATHANASIOS S, MICHIEL S. Fully integrated wide input voltage range capacitive DC-DC converters: the folding Dickson converter[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2015, 50(7): 1560-1570.
- [23] CHEN X R, RUAN X B, YANG D S, et al. Step-by-step controller design of voltage closed-loop control for virtual synchronous generator[C] // 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), September 20-24, 2015, Montreal, QC, Canada: 3760-3765.
- [24] ROUZBEHI K, ARASH M, JOSE L C, et al. A generalized voltage droop strategy for control of multiterminal DC grids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(1): 607-618.
- [25] LUIS E Z, PETER W L. A high efficiency unidirectional DC/DC converter for integrating distributed resources into DC microgrids[C] // 2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM), June 7-10, 2015, Atlanta, GA, USA: 280-284.
- [26] OCTAVIAN C, GHEORGHE D A, NICOLAE M, et al. Bidirectional power flow control in a DC microgrid through a switched-capacitor cell hybrid DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(4): 3012-3022.

收稿日期: 2019-09-09; 修回日期: 2020-03-02

作者简介:

聂永刚(1972—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为新能源技术的应用研究。E-mail: 2216983523@qq.com

(编辑 葛艳娜)