

# 含双有源桥式 DC-DC 变换器的多端直流系统稳定性分析

刘 焱<sup>1,2</sup>, 孔 力<sup>1,2</sup>, 邓 卫<sup>1,2</sup>, 裴 玮<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院洁净能源创新研究院, 大连 116023)

**摘要:** 通过柔性直流技术将多个交直流系统互联形成多端直流系统, 是未来电网的重要形态之一。不同电压等级的直流系统可以通过双有源桥式 DC-DC 变换器接入直流母线。文章建立了含双有源桥式 DC-DC 变换器的多端直流系统的戴维南等效电路及其状态空间小信号模型, 提出了适用于多端直流系统的阻抗匹配稳定性分析方法; 分析研究了静态工作点、传输线长度、直流电容大小等参数变化对系统稳定性的影响, 进一步利用奈奎斯特稳定判据确定系统的稳定边界; 并搭建了多端直流系统的仿真模型, 通过仿真分析对所提出的稳定性分析方法和结论相应进行了验证。

**关键词:** 双有源桥式 DC-DC 变换器; 多端直流系统; 小信号模型; 稳定性分析

**DOI:** 10.12067/ATEEE2002045

**文章编号:** 1003-3076(2020)10-0010-10

**中图分类号:** TM712

## 1 引言

随着可再生能源技术的不断进步, 分布式发电规模和直流负载规模的快速增加, 直流电网凭借其易于接入、损耗低、电能质量高等优势, 得到了迅速发展<sup>[1]</sup>。另一方面, 现有交流系统的基础设施完善, 技术方案成熟, 目前仍然是电力系统的主要组成形式。为了进一步提高电网运行效率, 集成大量分布式能源单元和已有网络设备, 建设具备高度可靠性和灵活性的智能电网已经成为电力系统发展的主要趋势和必然要求<sup>[2]</sup>。

通过电力电子装置将多个交流系统和直流系统进行互联是构建新一代电力网络的常用方案之一<sup>[3,4]</sup>。但由于互联后的直流母线电压等级和直流系统的电压等级可能有所差异, 需要通过直流变压器进行变压。双有源桥式 DC-DC 变换器(Dual Active Bridge, DAB)因其具有双向能量传输能力、功率密度较高、可以实现零电压开关、能够完成电气及故障隔离等固有优势, 而受到广泛关注, 成为系统级直流变压器的常用拓扑<sup>[5]</sup>。

为了研究 DAB 等大功率电力电气器件的接入对系统稳定性的影响, 通常采用基于阻抗的分析方

法<sup>[6,7]</sup>。相较于建立整个系统的稳态模型并根据零极点的分布进行稳定性分析的方法, 阻抗法的优点是可以通过各个子系统的端口特性对系统稳定情况进行研究, 极大简化了复杂系统的分析过程<sup>[8,9]</sup>。Middlebrook 阻抗比判据是一种经典的阻抗稳定分析方法, 该方法通过系统阻抗的幅频特性对稳定情况进行判定, 为了系统稳定, 需要在全频段范围保证输出阻抗不超过输入阻抗<sup>[10]</sup>。文献[11]通过建立小信号模型计算了 DAB 的输出阻抗, 并对其阻抗特性进行了分析, 研究了 DAB 接入直流网络时对系统稳定性的影响。文献[12]建立了基于 DAB 的级联直流系统, 通过对各级输入输出阻抗的计算和分析, 对不同静态工作点下的系统稳定情况进行了判定。文献[13]通过设计协调阻尼控制器, 对基于 DAB 的背靠背直流系统的阻抗特性进行了改善, 提升了系统稳定裕度。但是, 目前对于含 DAB 的直流系统研究主要以拓扑结构比较简单的级联网络为对象, 而对包含多个电力电子变换器的多端直流系统建模和稳定性分析则较少涉及。针对这一问题, 本文提出了基于阻抗匹配的系统稳定性分析方法, 建立了柔性变换器、DAB 和直流线路的小信号数学模型, 分析了各子系统的端口特性, 进行了多端直流系统

**收稿日期:** 2020-02-28

**基金项目:** 中国科学院前沿重点项目(QYZDY-SSW-JSC025)、中国科学院先导 A 项目(XDA21050000)

**作者简介:** 刘 焱(1990-), 男, 陕西籍, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定性分析;

裴 玮(1982-), 男, 江西籍, 研究员, 博士, 研究方向为直流配电系统运行控制。

稳定性分析,并通过 Matlab/Simulink 仿真软件对所提出的稳定性分析方法进行了验证。

## 2 含 DAB 的多端直流系统数学模型

### 2.1 多端直流系统结构

含 DAB 的多端直流系统结构示意图如图 1 所示。系统由交流网络、直流网络、柔性电力电子变换器 (Voltage Source Converter, VSC)、DAB 和直流线路

路构成。交流网络的电压等级均为 380 V,通过 VSC 并入电压等级为 800 V 的直流网络。该电压等级同时为 DAB 高压侧的电压等级,DAB 低压侧的直流网络电压等级为 400 V。其中,高压侧直流网络采用主从控制方式,由主换流站控制直流网络电压的稳定。DAB 通过采用单移相控制方式 (Single Phase Shift, SPS) 保证低压侧直流系统电压稳定。

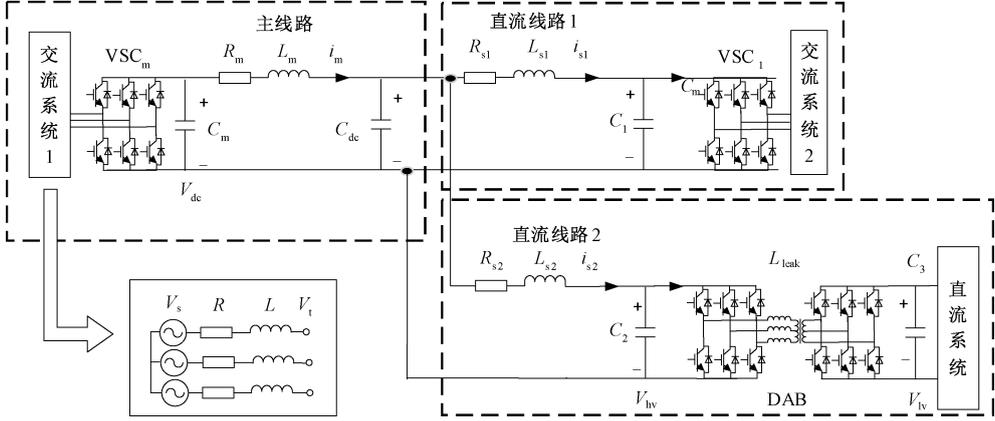


图 1 含 DAB 的多端直流系统拓扑结构示意图

Fig.1 Topologies of multi-terminal DC system with DAB

为了获得含 DAB 的多端直流系统的等效模型,下面分别对 VSC 变换器、DAB 以及直流线路进行数学建模。

### 2.2 柔性变换器模型

根据图 1 中所示的 VSC 变换器电路可以得到 dq 坐标系下的变换器数学模型为:

$$\begin{cases} V_{sd} - V_{td} = L \frac{di_d}{dt} + Ri_d - \omega Li_q \\ V_{sq} - V_{tq} = L \frac{di_q}{dt} + Ri_q + \omega Li_d \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $V_{sd}$ 、 $V_{sq}$  分别为 dq 坐标系下的三相交流电网电压;  $V_{td}$ 、 $V_{tq}$  分别为变换器交流侧端口处电压;  $i_d$ 、 $i_q$  分别为 dq 坐标系下三相交流电网电流;  $L$  为交流侧等效滤波电感;  $R$  为等效串联电阻。忽略换流器内部功率损耗,根据功率平衡可以得到:

$$V_{dc} i_{dc} = 1.5(i_d V_{td} + i_q V_{tq}) \quad (2)$$

式中,  $V_{dc}$  为变换器直流侧电压;  $i_{dc}$  为直流侧电流。VSC 采用基于 PWM 的调制方式,变换器交流侧端口电压  $V_t$  和直流侧电压  $V_{dc}$  的关系为:

$$V_t = V_{dc} m \quad (3)$$

式中,  $m$  为 VSC 变换器的调制度。将式(1)~式(3)联立整理后进行线性化处理,得到对应的小信号数

学模型,并且改写为状态空间形式:

$$\begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \end{bmatrix} = (sI - A)^{-1} (B_1 \Delta m_d + B_2 \Delta m_q + B_3 \Delta V_{sd} + B_4 \Delta V_{sq} + D \Delta V_{dc}) \quad (4)$$

$$\Delta V_{dc} = C(sI - A)^{-1} (B_1 \Delta m_d + B_2 \Delta m_q + \frac{V_{dc}}{i_{dc}} \Delta i_{dc}) +$$

$$\begin{aligned} & [C(sI - A)^{-1} B_3 + \frac{3i_d}{2i_{dc}}] \Delta V_{sd} + \\ & [C(sI - A)^{-1} B_4 + \frac{3i_q}{2i_{dc}}] \Delta V_{sq} \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $s$  为拉式算子;  $I$  为单位矩阵,且

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{L}{R} & \omega \\ -\omega & -\frac{L}{R} \end{bmatrix} \quad B_1 = \begin{bmatrix} -\frac{V_{dc}}{L} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{V_{dc}}{L} \end{bmatrix} \quad B_3 = \begin{bmatrix} 1 \\ L \end{bmatrix}$$

$$B_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ L \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} \frac{3V_d}{2i_{dc}} & \frac{3V_q}{2i_{dc}} \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} -\frac{m_d}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{m_q}{R} \end{bmatrix}$$

由于系统采用主从控制模式, VSC 变换器的控制方法如图 2 所示, 主站的直流电压参考值  $V_{dc}^*$  和从站的传输功率参考值  $P_s^*$ 、 $Q_s^*$  恒定。外环和内环的 PI 控制器分别用  $G_p(s)$ 、 $G_i(s)$  表示。

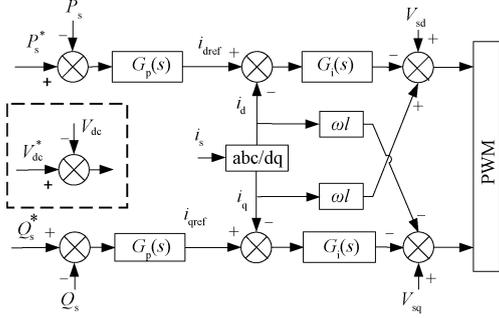


图 2 VSC 变换器主从控制框图

Fig.2 Master-slave control structure of VSC

为了简化分析, 认为所连接的是理想交流系统, 其对应的扰动量为 0, 同时可以忽略 dq 控制的耦合项和无功功率对系统稳定性的影响<sup>[14]</sup>。根据控制框图可以得到主站的 dq 轴控制分量分别为:

$$\begin{cases} \Delta m_{md} = G_i(s) [-G_p(s) \Delta V_{dc} - \Delta i_d] \\ \Delta m_{mq} = -G_i(s) \Delta i_q \end{cases} \quad (6)$$

从站的 dq 轴控制分量分别为:

$$\begin{cases} \Delta m_{1d} = G_i(s) [-G_p(s) \Delta P - \Delta i_d] \\ \Delta m_{1q} = -G_i(s) \Delta i_q \end{cases} \quad (7)$$

联立式(4)~式(7)可得主站的直流侧端口电压为:

$$\Delta V_{mdc} = [-\Delta i_d G_i(s) EB_1 - \Delta i_q G_i(s) EB_2 + \Delta V_{sd}(EB_3 + D_1) + \Delta V_{sq}(EB_4 + D_2) + \Delta i_{dc}(EB_5 + D_3)]/H \quad (8)$$

从站的直流侧端口电压为:

$$\Delta V_{1dc} = -\Delta i_d G_i(s) EB_1 - \Delta i_q G_i(s) EB_2 + \Delta V_{sd}(EB_3 + D_1) + \Delta V_{sq}(EB_4 + D_2) + \Delta i_{dc}(EB_5 + D_3) \quad (9)$$

且  $D_1 = 3i_d/2i_{dc}$ ;  $D_2 = 3i_q/2i_{dc}$ ;  $D_3 = -V_{dc}/i_{dc}$ ;  $E = C(sI - A)^{-1}$ ;  $H = 1 + G_p(s)G_i(s)EB_1$ 。

根据式(8)和式(9)可以将直流侧端口电压的表达式改写为以下形式:

$$\Delta V_{dc} = \Delta U(s) + Z(s) \Delta i_{dc} \quad (10)$$

其中主站和从站的  $\Delta U(s)$  的表达式分别为:

$$\Delta U_m(s) = [-\Delta i_d G_i(s) EB_1 - \Delta i_q G_i(s) EB_2 + \Delta V_{sd}(EB_3 + D_1) + \Delta V_{sq}(EB_4 + D_2)]/H \quad (11)$$

$$\Delta U_1(s) = -\Delta i_d G_i(s) EB_1 - \Delta i_q G_i(s) EB_2 + \Delta V_{sd}(EB_3 + D_1) + \Delta V_{sq}(EB_4 + D_2) \quad (12)$$

输出输入阻抗表达式分别为:

$$Z_m(s) = (EB_5 + D_3)/H \quad (13)$$

$$Z_1(s) = (EB_5 + D_3) \quad (14)$$

### 2.3 双有源桥式 DC-DC 变换器模型

双有源桥式 DC-DC 变换器 (DAB) 的详细拓扑结构如图 3 所示。

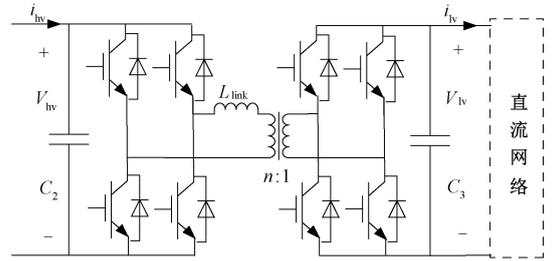


图 3 DAB 拓扑结构及单移相控制框图

Fig.3 Topologies of DAB DC-DC converter and single phase shift control structure

当 DAB 采用单移相控制方式时, 将移相比计为  $d$ , 有  $d \in [-0.5, +0.5]$ 。当 DAB 中高频隔离变压器的变比  $n$  取值为 1 时可以得到变换器的准稳态模型为:

$$\begin{cases} i_{hv} = \alpha V_{lv} d (1 - |d|) \\ i_{lv} = \alpha V_{lv} d (1 - |d|) \\ d = G_{dab}(V_{ref} - V_{lv}) \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $i_{hv}$ 、 $i_{lv}$  分别为 DAB 高压侧和低压侧的电流; 算子  $\alpha = 1/(2f_s L_{leak})$ ;  $f_s$  为 DAB 的开关频率;  $L_{leak}$  为高频隔离变压器的等效漏抗。对式(15)进行线性化处理整理得到 DAB 高压侧输入阻抗:

$$Z_2(s) = \frac{\Delta V_{lv}}{\Delta i_{lv}} = \frac{\Delta i_{lv}}{\beta[\beta - G_{dab}(s)\lambda V_{lv}]} + \lambda V_{lv} G_{dab}(s) \quad (16)$$

算子  $\lambda$ 、 $\beta$  的表达式分别如下:

$$\lambda = \alpha(1 - 2|d|), \beta = \alpha d(1 - |d|) \quad (17)$$

当 DAB 低压侧直流子系统等效为恒功率负荷时:

$$\frac{\Delta i_{lv}}{\Delta V_{lv}} = \frac{1}{C_3 s} - \frac{V_{lv}^2}{P_{\text{dload}}} \quad (18)$$

### 2.4 直流线路模型

针对图 1 所示系统,本文选取直流电容  $C_{dc}$  的两端为关键节点,系统的直流线路等效模型可以分为两类,二者对应的线路阻抗不同。本文采用  $\Pi$  型模型对直流线路进行等效,由于变换器直流侧端口的电容通常较大,所以可以将直流线路分布电容与其整合,得到三端系统的  $\Pi$  型网络等效模型如图 4 所示。直流线路一和直流线路二所对应的等效模型为图 4(a),主线路所对应的等效模型为图 4(b)。

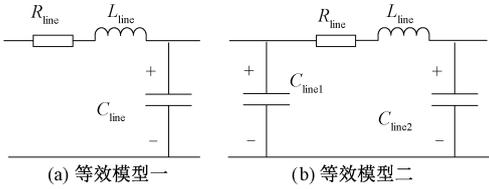


图 4 直流线路拓扑

Fig.4 Topologies of DC line

可以得到两种直流线路等效模型的阻抗  $Z_{\text{linea}}$  和  $Z_{\text{lineb}}$  分别为:

$$Z_{\text{linea}}(s) = \frac{L_{\text{line}}s + R_{\text{line}}}{L_{\text{line}}C_{\text{line}}s^2 + R_{\text{line}}C_{\text{line}}s + 1} \quad (19)$$

$$Z_{\text{lineb}}(s) = [1, 0, 0](sI - F)^{-1} [1/C_{\text{line2}}, 0, 0]^T \quad (20)$$

其中

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1/C_{\text{line2}} \\ 0 & 0 & 1/C_{\text{line1}} \\ 1/L_{\text{line}} & -1/L_{\text{line}} & -R_{\text{line}}/L_{\text{line}} \end{bmatrix}$$

### 2.5 多端直流系统的等效电路

由图 1 可以看出,系统组成能够分为三部分,结合所得到的数学模型式(10)~式(20)可以看出含 DAB 的多端直流系统可以等效为由多个受控源和阻抗组成的模式,对应的戴维南等效电路如图 5 所示。

根据图 5 可以看出,主站 VSC 变换器控制直流电压,因此将其定义为源变换器。而从站和 DAB 变换器主要控制功率以及直流子系统的直流电压,定义为负载变换器,可以得到所选节点处两侧的输出和输入阻抗分别为:

$$Z_{\text{out}}(s) = Z_m(s) + Z_{\text{linein}}(s) \quad (21)$$

$$Z_{\text{in}}(s) = [Z_1(s) + Z_{\text{line1}}(s)]/[Z_2(s) + Z_{\text{line2}}(s)] \quad (22)$$

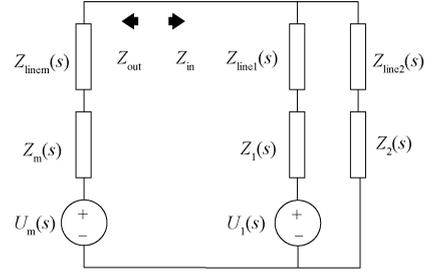


图 5 系统戴维南等效电路

Fig.5 Thevenin equivalent circuit of system

式中,输出阻抗  $Z_{\text{out}}$  由主站变换器阻抗  $Z_m$  和主线路阻抗  $Z_{\text{linein}}$  组成;输入阻抗由从站变换器阻抗  $Z_1$ 、DAB 阻抗  $Z_2$  和直流线路阻抗  $Z_{\text{line1}}$  和  $Z_{\text{line2}}$  组成。

### 3 含 DAB 的多端直流系统稳定性分析

通过绘制阻抗的波特图可以对多端系统各部分的端口特性进行分析。同时本文采用奈奎斯特稳定判据对含 DAB 的多端直流系统稳定性进行分析。当系统输入和输出阻抗比的奈奎斯特曲线不包含负极点  $(-1, j0)$  点时,系统稳定。本文采用 Matlab 对系统的输出和输入阻抗进行计算,同时绘制了相应的波特图和奈奎斯特曲线。所采用的系统电气参数和控制器参数分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 含 DAB 的多端直流系统参数

参数	数值	参数	数值
$R/\Omega$	0.000 15	$L/\text{mH}$	0.372
$R_m/\Omega$	0.005 46	$L_m/\text{mH}$	0.001 47
$R_1/\Omega$	0.036 4	$L_1/\text{mH}$	0.098
$R_2/\Omega$	0.027 3	$L_2/\text{mH}$	0.073 5
$C_m/\mu\text{F}$	702 0	$C_1/\mu\text{F}$	105 0
$C_2/\text{F}$	0.01	$C_3/\text{F}$	0.096
$C_{dc}/\mu\text{F}$	1 000	$f_s$	5 000
$V_{dref}/\text{V}$	800	$V_{lref}/\text{V}$	400
$P_1/\text{kW}$	225	$P_{\text{dload}}/\text{kW}$	100

表 2 多端直流系统控制器参数

控制器	比例参数	积分参数
$G_p$	1.51	25
$G_i$	22.3	6
$G_{\text{dab}}$	0.004 5	0.035 5

#### 3.1 变换器传输功率对端口特性的影响

根据表 1 中系统参数的取值分别计算系统中主站直流侧端口阻抗  $Z_m$ 、从站直流侧端口阻抗  $Z_1$ 、

DAB 高压侧阻抗  $Z_2$ , 以及各段直流线路的阻抗并按式(21)和式(22)进行合并, 画出多端系统的各部分输入和输出阻抗的波特图如图6所示。

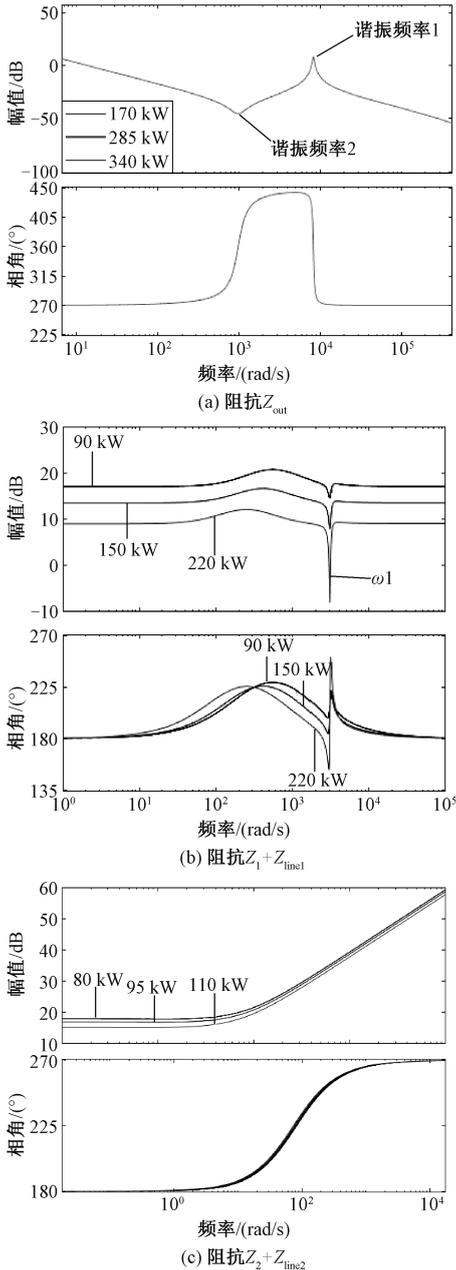


图6 传输功率变化时阻抗仿真波特图对比

Fig.6 Bode diagrams of regional impedance

从图6(a)可以看出, 三端交直流混合系统的输出阻抗  $Z_{out}$  具有双惯量特性, 其幅频特性曲线中存在一个谐振峰值频率  $\omega_1$  和一个反谐振峰值频率  $\omega_2$ 。使通过定直流电压站变换器向多端直流网络输送的整流功率从 170 kW 增大到 340 kW, 可发现三组幅频响应和相频响应曲线近乎重合在一起, 也就是说输出阻抗的幅值和谐振频率受传输功率变化

的影响较小。

从图6(b)看出, 随着从站  $VSC_1$  向交流系统1输送的逆变功率从 90 kW 增加到 220 kW, 输入阻抗在全频段的增益降低, 这意味着变换器的调节能力随着传输功率的升高而减弱, 不利于系统保持稳定。同时, 系统具有一个谐振频率  $\omega_3$ , 该频率几乎不受传输功率影响, 但谐振频率的峰值随着传输功率增大而降低。

图6(c)为输入阻抗  $Z_2 + Z_{line2}$  的仿真结果, 可看出阻抗在低频段体现出恒功率特性, 转折频率以上表现为容性。这主要是由于当系统中 DAB 采用单移相控制低压侧直流电压恒定时, DAB 所传输的功率不易受其他扰动影响而表现出恒功率特性。随着 DAB 所连接的直流子系统负荷从 80 kW 提升至 100 kW, 输入阻抗的低频段增益降低, 转折频率变化不显著。

### 3.2 电气参数对阻抗特性的影响

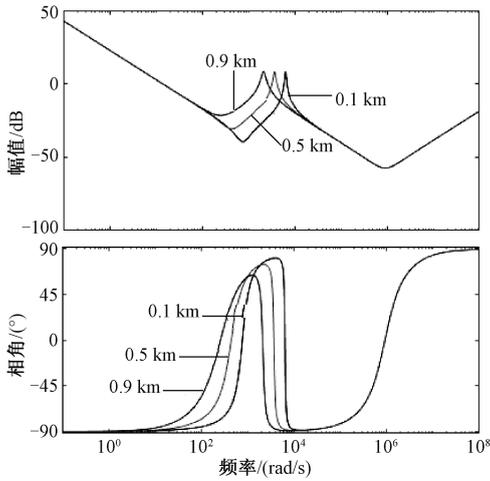
三端直流线路的长度变化时系统阻抗的仿真结果如图7所示, 线路长度主要影响了直流线路等效电感和电阻的取值, 线路分布电容由于取值较小故假设不受线路长度变化的影响。从图7(a)中可以看出随着主站线路长度增加, 系统输出阻抗的谐振频率会向低频段移动, 但是峰值几乎不变。 $\omega_1$  和  $\omega_2$  之间频段的增益提升。而传输线路长度的增加对输入阻抗全频段幅值的影响较小。从图7(b)中看出从站线路长度增大时谐振频率向低频段移动, 谐振峰值和全频段幅值变化较小。从图7(c)中看出直流线路长度变化对 DAB 阻抗的影响较小。

$$P_{dab} = \frac{nV_{lv}V_{lv}}{2f_s L_{leak}} d(1-d) \quad (23)$$

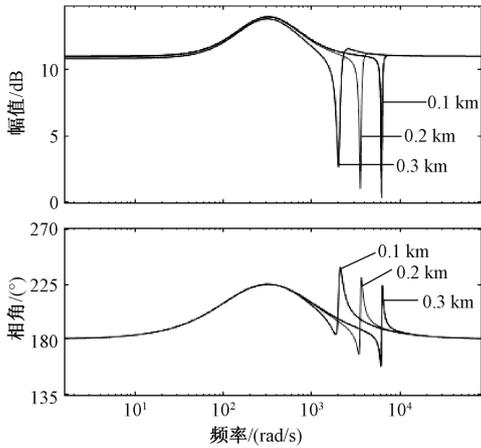
DAB 的高频隔离变压器的等效漏感  $L_{leak}$  对  $Z_2$  的影响如图8所示。当等效漏感  $L_{leak}$  的取值从 0.017 mH 增大至 0.051 mH 时,  $Z_2$  的转折频率变小, 具有恒功率特性的频段收窄, 同时容性频段的增益获得提升, 输入阻抗的惯性增大。但是根据 DAB 的瞬时传输功率计算式(22)可看出, 等效漏感  $L_{leak}$  增大会使得 DAB 的最大传输功率减小。所以, 为保证 DAB 的额定容量不过分降低, 不可以轻易增大高频隔离变压器的等效漏感。

### 3.3 稳定性分析

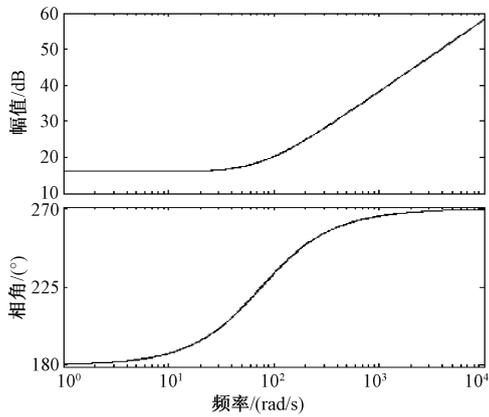
通过以上的分析可以初步确定系统各部分的端口阻抗特性。对图1所示的三端直流系统稳定性进行分析。图9为主从控制模式下, 从站  $VSC_1$  向交



(a) 阻抗  $Z_{out}$



(b) 阻抗  $Z_1 + Z_{line1}$



(c) 阻抗  $Z_2 + Z_{line2}$

图 7 传输线路长度对系统阻抗的影响

Fig.7 Bode diagrams of regional impedance

流系统 1 传输功率变化时的输出和输入阻抗仿真结果。

图 9(a)为系统输出和输入阻抗  $Z_{out}$  和  $Z_{in}$  的波特图,可以看出当从站 VSC<sub>1</sub> 逆变功率为 225 kW 时,输入阻抗的  $Z_{in}$  幅值高于输出阻抗  $Z_{out}$  的幅值,此时阻抗匹配,系统稳定。随着逆变功率增加,输入

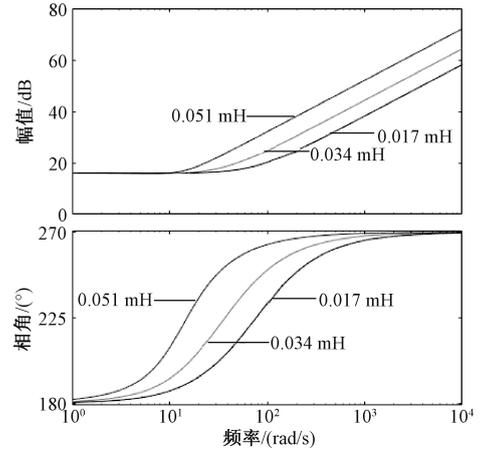
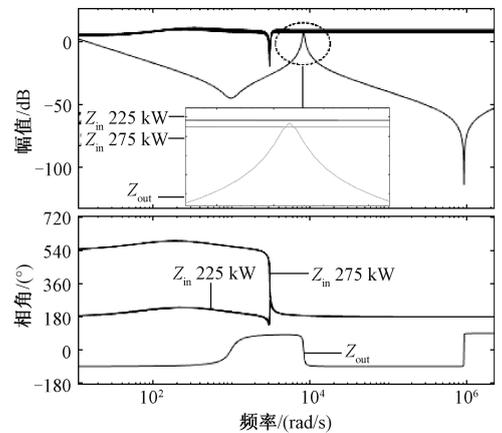
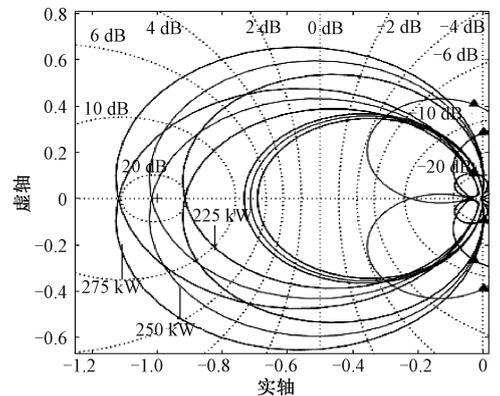


图 8  $L_{leak}$  对  $Z_2$  的影响

Fig.8 Bode diagrams of  $Z_2$



(a)  $Z_{out}$ 、 $Z_{in}$  波特图



(b)  $Z_{out}$ 、 $Z_{in}$  阻抗比奈奎斯特曲线

图 9 换流站 VSC1 功率变化时阻抗仿真结果

Fig.9 Impedance simulation of variety VSC1 power

阻抗  $Z_{in}$  在全频段的增益降低。当逆变功率达到 250 kW 时,在谐振频率处,输入阻抗的  $Z_{in}$  幅值低于输出阻抗  $Z_{out}$  的幅值,此时阻抗不匹配,系统失稳。由图 9(b)可以看出,随着 VSC1 的逆变功率增大,阻抗比  $Z_{out}/Z_{in}$  的奈奎斯特曲线向左半平面移动,系

统稳定性减弱。并且在 VSC1 站的逆变功率达到 250 kW 时,奈奎斯特曲线包围  $(-1, j0)$  点,系统出现失稳现象。

由于 DAB 具有双向能量传输能力,所以不但可以通过其向直流负荷供电,同时,可再生能源及储能也可以通过 DAB 接入多端直流系统。令换流站 VSC1 的逆变功率恒定为 180 kW,直流子系统向三端系统输送能量,不同直流子系统传输功率条件下的系统输出和输入阻抗波特图如图 10(a) 所示。可以看出随着直流子系统向多端系统输送功率提高,输入阻抗  $Z_{in}$  全频段的幅值升高,系统的稳定裕度得到改善。通过图 10(b) 可以看出,随着传输功率增大,阻抗比奈奎斯特曲线向右半平面移动,系统稳定性得到改善。

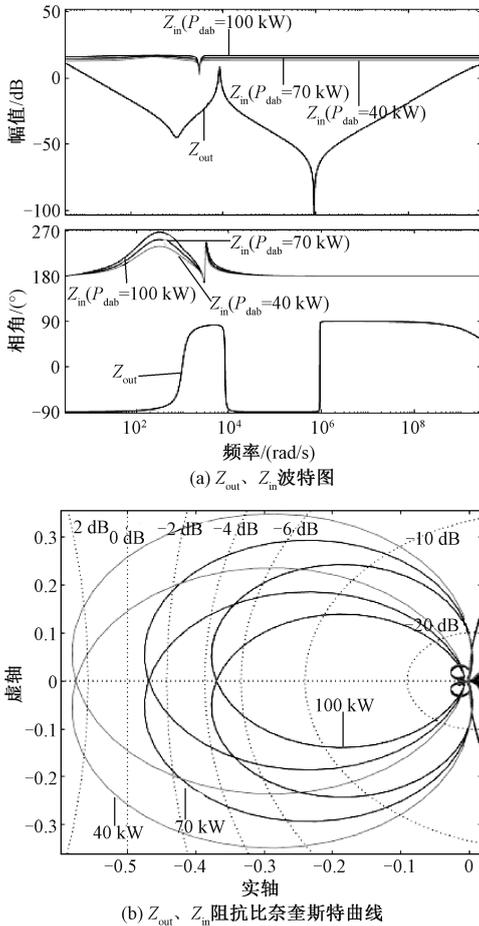


图 10 DAB 功率变化时阻抗仿真结果

Fig.10 Impedance simulation of variety DAB power

令 VSC<sub>1</sub> 站向交流系统 1 输送的功率为 250 kW,绘制直流电容  $C_{dc}$  变化时的系统阻抗波特图。结果如图 11(a) 所示,可以看出当直流电容  $C_{dc}$  为 1 mF 时,谐振频率处的输入阻抗的  $Z_{in}$  幅值低于

输出阻抗  $Z_{out}$  的幅值,此时阻抗不匹配,系统失稳。随着  $C_{dc}$  增大,输出阻抗  $Z_{out}$  在谐振频率  $\omega_1$  附近频段的增益降低。当  $C_{dc}$  为 2 mF 时,输入阻抗的  $Z_{in}$  幅值高于输出阻抗  $Z_{out}$  的幅值,此时阻抗匹配,系统可以稳定运行。通过图 11(b) 所示的阻抗比奈奎斯特曲线可以看出,  $C_{dc}$  为 1 mF 时,曲线包含  $(-1, j0)$  点,而随着电容增大,曲线向右半平面移动,系统稳定性提高。当  $C_{dc}$  为 2 mF 时奈奎斯特曲线不再包含  $(-1, j0)$  点,系统恢复稳定。

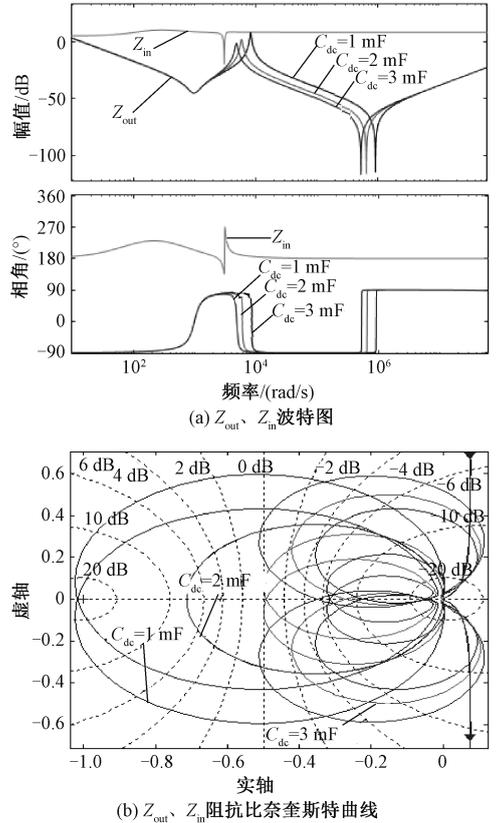


图 11  $C_{dc}$  变化时阻抗仿真结果

Fig.11 Impedance simulation of variety  $C_{dc}$

### 4 仿真验证

在 Matlab/Simulink 中,根据第 3 节所提的稳定性分析条件搭建仿真模型,仿真结果如图 12 所示。

从图 12 可以看出,VSC1 的逆变功率初始值为 225 kW,令多端直流网络的分布电容  $C_{dc} = 1\text{ mF}$ 。当 VSC1 的逆变功率为 250 kW 时,直流母线电压能够保持稳定;当功率提升至 275 kW 时,系统失稳,换流站传输功率波动,直流母线电压发散振荡。当  $C_{dc}$  取值为 3 mF 时,在同样的潮流条件下,系统依然能够保持稳定,直流母线电压和传输功率均可维持稳

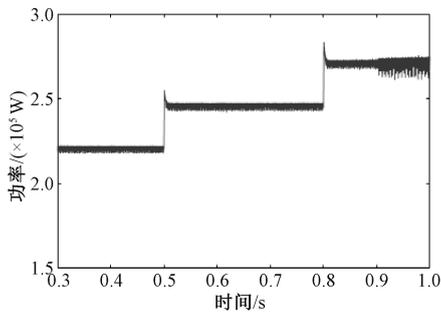
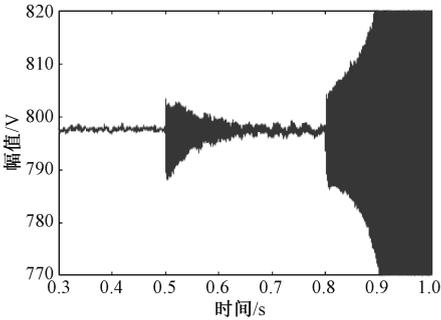
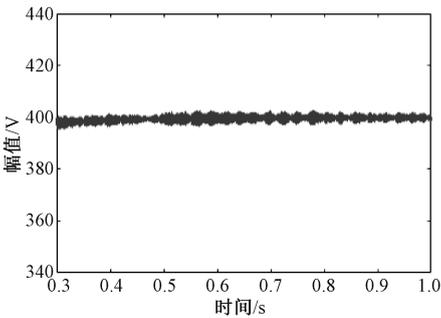
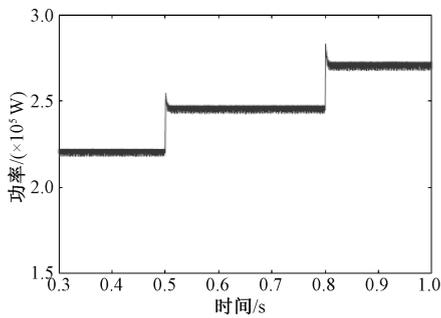
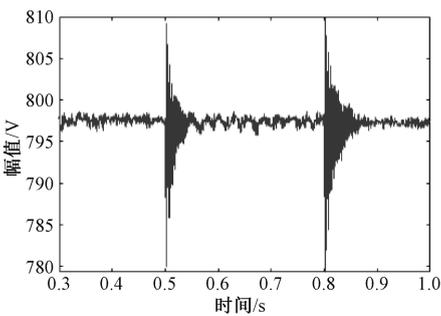
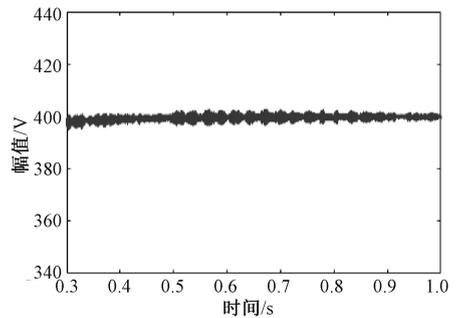
(a)  $C_{dc}=1$  mF时, VSC1直流侧功率(b)  $C_{dc}=1$  mF时, 直流母线电压 $V_{dc}$ 波形(c)  $C_{dc}=1$  mF时, DAB低压侧电压 $V_{out}$ 波形(d)  $C_{dc}=3$  mF时, VSC1直流侧功率(e)  $C_{dc}=3$  mF时, 直流母线电压 $V_{dc}$ 波形(f)  $C_{dc}=3$  mF时, DAB低压侧电压 $V_{out}$ 波形

图 12 含 DAB 多端直流系统稳定性仿真结果

Fig.12 Simulation of stability of MTDC system

态。DAB 低压侧输出电压受 VSC1 的逆变功率的扰动影响较小,始终能够保持输出电压稳定。仿真结果与稳定性分析的结果一致。

图 13(a)、13(b)对比了在图 1 所示的直流子系统通过 DAB 向直流网络输送不同功率的条件下,三端交直流混联系统的直流母线电压和 VSC1 传输功率的波形。由图 13 可知,直流子系统输送功率为 100 kW 时,令 VSC1 向交流系统输送的能量不断增加,当 VSC1 的传输功率达到 300 kW 时,直流母线电压发散振荡,VSC1 的传输功率产生波动,系统失稳;而直流子系统输送功率为 200 kW 时,同样令 VSC1 的传输功率逐渐升高,当达到 300 kW 时,直流母线电压和 VSC1 的传输功率仍然能够基本保持稳定。通过对比可知,直流子系统向多端网络输送的能量增大,能够改善系统稳定性、提升稳定裕度,仿真所显示的结果与稳定性分析的结论一致。

## 5 结论

目前含 DAB 的直流系统稳定性分析的主要研究对象是系统结构较为简单的级联直流系统,而对复杂系统的稳定性分析较少涉及。本文从多端直流系统角度出发,建立了含 DAB 的多端直流系统小信号模型,提出了适用于含 DAB 的多端直流系统的阻抗匹配稳定性分析方法。对系统的阻抗特性及稳定性进行了分析,结合仿真结果得到以下结论。

①通过小信号模型和戴维南等效定理可以得到复杂多端直流系统各部分的阻抗,方便进行系统稳定性分析。②通过对系统阻抗特性的分析可知,主从控制模式下系统稳定性受电容的影响较大,而受线路电感和电阻的影响较小;适当增大 DAB 的等效漏抗能够改善其阻抗特性,但需注意对最大允许传输功率的影响。③根据稳定性分析得知,当主从控

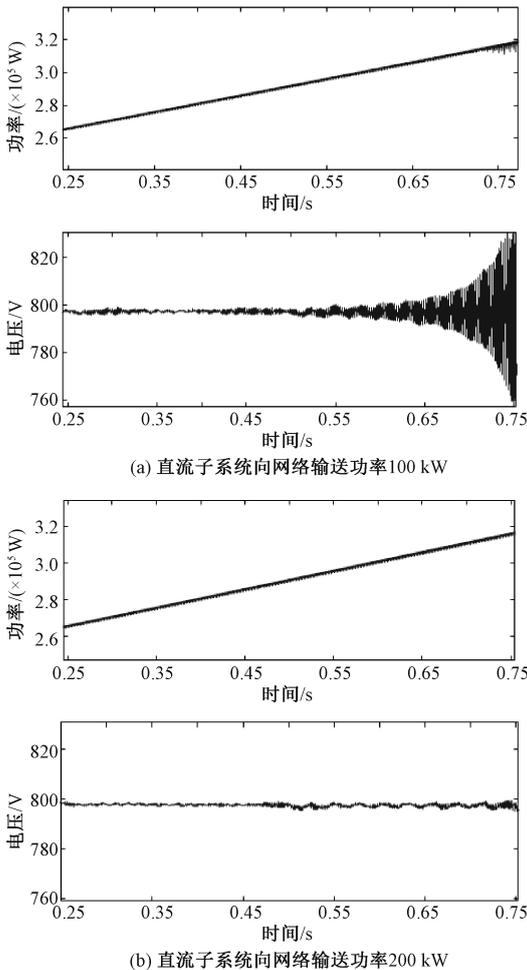


图13 直流母线电压和从站功率波形仿真结果

Fig.13 Simulation of DC line voltage and slave converter power

制模式下的从站逆变功率持续增加超过稳定边界时,系统将会失稳;DAB向多端直流网络注入功率时可以能够对系统稳定性能进行改善、从而提升稳定裕度。

### 参考文献 (References):

[1] 汤广福, 罗湘, 魏晓光 (Tang Guangfu, Luo Xiang, Wei Xiaoguang). 多端直流输电与直流电网技术 (Multi-terminal HVDC and DC-grid technology) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2013, 33 (10): 8-17, 24.

[2] 江道灼, 郑欢 (Jiang Daozhuo, Zheng Huan). 直流配电网研究现状与展望 (Research status and developing prospect of DC distribution network) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2012, 36 (8): 98-104.

[3] 徐政 (Xu Zheng). 柔性直流输电系统 (Flexible HVDC system) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Bei-

jing: China Machine Press), 2014.

- [4] 孔力, 裴玮, 叶华, 等 (Kong Li, Pei Wei, Ye Hua, et al.). 交直流混合配电系统形态、控制与稳定性研究 (Review of pattern, control and stability for hybrid AC/DC distribution power systems) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (9): 1-10.
- [5] 孙凯, 陈欢, 吴红飞 (Sun Kai, Chen Huan, Wu Hongfei). 面向储能系统应用的隔离型双向 DC-DC 变换器分析方法与控制技术综述 (A review of analysis method and control technology for isolated bidirectional DC-DC converter used in energy storage systems) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (8): 1-9.
- [6] Riccobono A, Santi E. Comprehensive review of stability criteria for dc power distribution systems [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50 (5): 3525-3535.
- [7] Sun Jian. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26 (11): 3075-3078.
- [8] Anand S, Fernandes B G. Reduced-order model and stability analysis of low-voltage DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60 (11): 5040-5049.
- [9] Feng X G, Liu J J, Lee F C. Impedance specifications for stable dc distribution system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17 (2): 151-157.
- [10] Middlebrook R D. Input filter considerations in design and application of switching regulators [A]. IEEE Industry Applications Soc. [C]. Chicago, USA, 1976. 1-6.
- [11] Hu Jingxin, An Zheng, Cui Shenghui, et al. Impedance modeling and stability analysis of dual-active bridge converter interfacing DC grids [A]. 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition [C]. Portland, OR, USA, 2018. 4907-4914.
- [12] Khazraei M, Prabhala V A K, Ahmadi R, et al. Solid-state transformer stability and control considerations [A]. 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC 2014 [C]. Fort Worth, TX, USA, 2014. 2237-2244.
- [13] Tian Y, Peng F, Wang Y, et al. Coordinative impedance damping control for back-to-back converter in solar power integration system [J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 13 (9): 1484-1492.
- [14] Radwan A A A, Mohamed Y A I. Assessment and mitigation of interaction dynamics in hybrid AC/DC distribution generation systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3 (3): 1382-1393.

## Stability analysis of multi-terminal DC system with dual active bridge DC-DC converters

LIU Yao<sup>1,2</sup>, KONG Li<sup>1,2</sup>, DENG Wei<sup>1,2</sup>, PEI Wei<sup>1,2,3</sup>

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Dalian National Laboratory for Clean Energy, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China)

**Abstract:** The multi-terminal DC system comprised of multiple AC/DC systems by flexible DC technology is one of the important forms of future power grid. Dual active bridge DC-DC converters can connect several DC networks with different voltage levels. Here, the Davenan equivalent circuit and its state space small signal model of multi-terminal DC system with dual active bridge DC-DC converter are established. An impedance-based stability analysis method is proposed. The influences of parameters such as static operating point, line length and DC capacity on the stability are analyzed. The stability boundary is determined by using Nyquist criterion. The simulation model of the multi-terminal DC system is built and the proposed stability analysis method and conclusions are verified.

**Key words:** dual active bridge DC-DC converter; multi-terminal DC system; small signal model; stability analysis