

## 基于虚拟阻尼指标的柔性直流电网小信号稳定性分析

付强<sup>1</sup>, 杜文娟<sup>2</sup>, 王海风<sup>2</sup>

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 102206; 2. 四川大学电气工程学院, 四川省成都市 610064)

**摘要:**近年来柔性直流电网得到了广泛关注和快速发展,柔性直流电网的稳定是保证交直流混联电力系统正常运行的重要前提。文中针对柔性直流电网,首先建立了不同控制方法下电压源型换流站和柔性直流电网的线性化模型,构建了以柔性直流电网中直流电压振荡模式为分析目标的柔性直流电网线性化互联模型。基于此,提出了一种物理意义更加明确的虚拟阻尼分析法,并对其概念和原理进行了介绍。然后,提出了能够评估电压源型换流站控制对柔性直流电网稳定性影响大小的虚拟阻尼指标,定量刻画了不同控制方法下电压源型换流站对柔性直流电网中直流电压振荡模式的影响。进一步,基于该虚拟阻尼指标,提出了适用于柔性直流电网中换流站控制参数的协调优化方法,提升了直流电网的小信号稳定性。最后,以一个三端柔性直流电网为例,详细展示了电压源型换流站虚拟阻尼的计算方法,并在包含下垂控制的复杂十端柔性直流电网中验证了多换流站参数优化方法的有效性及其相比于传统参数优化方法的优势。

**关键词:**电压源型换流站; 柔性直流电网; 虚拟阻尼分析; 小信号稳定性

### 0 引言

近年来,随着可再生能源的大力开发和全球能源互联网的逐步推进<sup>[1-2]</sup>,柔性直流输电凭借其控制灵活、能够与弱交流电网互联、不存在换相失败等诸多优势得到了广泛推广<sup>[3-4]</sup>,由其拓展而成的多端柔性直流输电更被认为是解决风电场并网最有效的方式<sup>[5]</sup>,成了构建未来智能电网的关键技术<sup>[6]</sup>,得到了国内外的大力发展<sup>[7-8]</sup>。

柔性直流电网中控制方式主要有3种:主从控制、裕度控制和下垂控制<sup>[9-11]</sup>。关于多端交直流混联电力系统小信号稳定性的研究,目前多集中在多端柔性直流电网接入同一交流系统对稳定性的影响。例如,文献[12]建立了多端柔性直流电网接入同一交流网后混联系统的线性化模型,研究了主从控制参数对混联系统小信号稳定性的影响,给出了合理参数的选取意见。文献[13]采用模式分析法,分析了主从控制的多端交直流混联系统在不同类型故障中的参与性,得出了换流站控制及其直流线路模型的选择会对结果产生明显影响。文献[14]采用时域仿真法,分析对比了裕度控制和下垂控制对交流系统稳定性的不同影响,得出柔性直流电网中不

同控制策略会改变交流系统在扰动后的响应。此外,还有众多学者基于上述基本控制方法提出了新的控制方式,研究了其对同一交流系统稳定性的影响<sup>[15-16]</sup>。但是对于多端柔性直流电网连接多个独立交流系统的稳定性研究,目前成果较少。文献[17]采用时域仿真法指出采用下垂控制的多端柔性直流电网会传播独立交流系统间的扰动,然而其并未进行进一步深入分析,也没有解释其内在机理。

综上,柔性直流电网自身的小信号稳定性需要进行较为深入的分析,这是确保交直流混联电网稳定的重要前提。在柔性直流电网稳定性的研究方法上,模式分析法的分析结果缺乏一定的物理意义,而时域仿真法则较为复杂,所以需要提出一种较为简便的、物理意义较为明确的分析方法。在分析流程上,普遍将柔性直流电网当作一个整体进行分析,难以揭示系统中各个电压源型换流站控制对柔性直流电网稳定性的影响大小,所以需要将柔性直流电网合理拆解,详细阐明每个电压源型换流站控制对柔性直流电网稳定性的影响机理和规律。在控制参数优化方法上,主要采用基于灵敏度的参数调节方法,能够在单位调节幅度下为柔性直流电网提供更多的阻尼,然而这种调节方法容易将阻尼集中在某一个电压源型换流站上,如果该电压源型换流站退出运行,可能会导致整个系统的阻尼不足,引发柔性直流电网中的振荡现象。因此,本文针对上述问题,展开了针对性的研究。

收稿日期: 2019-07-05; 修回日期: 2019-12-09。

上网日期: 2020-04-13。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900602); 国家电网公司科技项目(52094017000W)。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

<http://www.aeps-info.com> 111

## 1 柔性直流电网的线性化模型

图1是一个 $N$ 端柔性直流电网,其中第 $j$ 个电压源型换流站用VSC $j$ 表示,其输出的有功功率为 $P_{dc,j}$ ,输出的电流为 $I_{dc,j}$ ,直流侧电容为 $C_j$ ;  $V_{dc,j}$ 为两端电压,  $j=1, 2, \dots, N$ ;  $L_{cj}$ 为交流线路的连接电感,  $j=2, 3, \dots, N$ ; 考虑到本文的研究对象主要为柔性直流电网,故交流系统假设为无穷大系统。

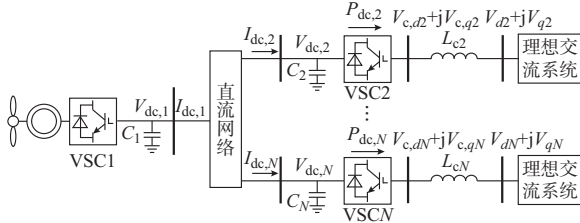


图1  $N$ 端柔性直流电网  
Fig. 1  $N$ -terminal flexible DC grid

### 1.1 电压源型换流站的线性化模型

柔性直流电网中,电压源型换流站的控制策略一般为定直流电压控制、直流电压下垂控制和定有功功率控制,为方便表述,本文将统一为如图2所示的控制形式<sup>[3]</sup>。图中,上标“ref”表示对应变量的参考值; $X_j$ 为VSC $j$ 与交流系统之间的电抗。当参数 $k_{pj}=0, k_{dj} \neq 0$ ,表示VSC $j$ 为定直流电压控制;当 $k_{pj} \neq 0, k_{dj}=0$ ,表示VSC $j$ 为定有功功率控制;当 $k_{pj} \neq 0, k_{dj} \neq 0$ ,表示VSC $j$ 为下垂控制。此外,忽略电压源型换流站拓扑和滤波器的高频动态过程<sup>[3-4]</sup>,图2中还包括了电压源型换流站有功控制外环,其控制环节为 $k_{p,dc,j} + k_{i,dc,j}s^{-1}$ ;有功和无功功率的电流控制内环,其控制环节分别为 $k_{p,id,j} + k_{i,id,j}s^{-1}$ 和 $k_{p,iq,j} + k_{i,iq,j}s^{-1}$ 。

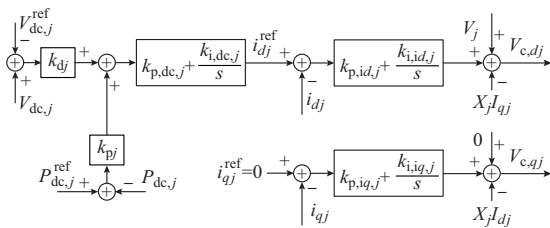


图2 VSC $j$ 的控制框图  
Fig. 2 Control diagram of VSC $j$

对于VSC $j, j=1, 2, \dots, N$ ,由图1可得交直流连接线路上的动态方程如式(1)所示。

$$\begin{cases} \frac{di_{dj}}{dt} = \frac{1}{L_{cj}} (V_{c,dj} - V_{dj}) + \omega i_{qj} \\ \frac{di_{qj}}{dt} = \frac{1}{L_{cj}} (V_{c,qj} - V_{qj}) - \omega i_{dj} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\omega$ 为同步频率; $i_{dj}$ 和 $i_{qj}$ 分别为VSC $j$ 输出的交

流电流幅值在 $d$ 轴和 $q$ 轴的分量; $V_{c,dj}$ 和 $V_{c,qj}$ 分别为VSC $j$ 交流侧的电压幅值在 $d$ 轴和 $q$ 轴的分量,选定交流系统的电压 $V_j$ 方向与其 $d$ 轴方向重合,则其 $q$ 轴分量为0,有 $V_{dj}=V_j, V_{qj}=0$ 。此外,考虑到本文的研究重点在柔性直流电网自身的稳定性,所以忽略了交流系统的动态过程,即认为交流系统的电压为常数。

VSC $j$ 直流侧电压的动态方程为:

$$\frac{dV_{dc,j}}{dt} = \frac{I_{dc,j}}{C_j} - \frac{P_{dc,j}}{C_j V_{dc,j}} = \frac{I_{dc,j}}{C_j} - \frac{V_{dj} i_{dj}}{C_j V_{dc,j}} \quad (2)$$

由图2可得,VSC $j$ 外环控制的动态方程为:

$$\begin{cases} i_{dj}^{\text{ref}} = k_{p,dc,j} k_{dj} (V_{dc,j} - V_{dc,j}^{\text{ref}}) + k_{p,dc,j} k_{pj} (P_{dc,j}^{\text{ref}} - P_{dc,j}) + z_{4j} + z_{3j} \\ i_{qj}^{\text{ref}} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} z_{3j} = k_{i,dc,j} k_{dj} \int (V_{dc,j} - V_{dc,j}^{\text{ref}}) dt \\ z_{4j} = k_{i,dc,j} k_{pj} \int (P_{dc,j}^{\text{ref}} - P_{dc,j}) dt \end{cases} \quad (4)$$

式中: $k_{p,dc,j}$ 和 $k_{i,dc,j}$ 为控制参数。

电流内环的动态方程为:

$$\begin{cases} V_{c,dj} = k_{p,id,j} (i_{dj}^{\text{ref}} - i_{dj}) + z_{1j} - \omega L_{cj} i_{qj} + V_{dj} \\ V_{c,qj} = k_{p,iq,j} (0 - i_{qj}) + z_{2j} + \omega L_{cj} i_{dj} \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} z_{1j} = k_{i,id,j} \int (i_{dj}^{\text{ref}} - i_{dj}) dt \\ z_{2j} = k_{i,iq,j} \int (0 - i_{qj}) dt \end{cases} \quad (6)$$

式中: $k_{p,id,j}$ 和 $k_{p,iq,j}$ 为控制参数。

将交直流连接线路上的动态方程式(1)线性化可得<sup>[12]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta i_{dj}}{dt} = -\frac{1}{L_{cj}} (k_{p,id,j} + k_{p,dc,j} k_{pj} k_{p,id,j} V_{dj}) \Delta i_{dj} + \frac{1}{L_{cj}} \Delta z_{1j} - \frac{k_{p,dc,j}}{L_{cj}} k_{p,id,j} k_{dj} \Delta V_{dc,j} + \frac{k_{p,id,j}}{L_{cj}} \Delta z_{3j} + \frac{k_{p,id,j}}{L_{cj}} \Delta z_{4j} \\ \frac{d\Delta i_{qj}}{dt} = -\frac{1}{L_{cj}} k_{p,iq,j} \Delta i_{qj} + \frac{1}{L_{cj}} \Delta z_{2j} \end{cases} \quad (7)$$

式中:“ $\Delta$ ”表示状态变量的变化量。

将直流侧电压的动态方程式(2)线性化可得<sup>[12]</sup>:

$$\frac{d\Delta V_{dc,j}}{dt} = -\frac{V_{dj0}}{C_j V_{dc,j0}} \Delta i_{dj} + \frac{V_{dj0} i_{dj0}}{C_j V_{dc,j0}^2} \Delta V_{dc,j} + \frac{1}{C_j} \Delta I_{dc,j} \quad (8)$$

式中:下标“0”表示状态变量的稳态值。

将VSC<sub>j</sub>控制环节的动态方程式(3)和式(5)线性化可得其外环控制的线性化方程为<sup>[12]</sup>:

$$\begin{cases} \Delta i_{dj}^{\text{ref}} = -k_{p,dc,j} k_{dj} \Delta V_{dc,j} - k_{p,dc,j} k_{pj} \Delta P_{dc,j} + \Delta z_{4j} + \Delta z_{3j} \\ \Delta i_{qj}^{\text{ref}} = 0 \\ \frac{d\Delta z_{3j}}{dt} = -k_{i,dc,j} k_{dj} \Delta V_{dc,j} \\ \frac{d\Delta z_{4j}}{dt} = -k_{i,dc,j} k_{pj} V_{dj} \Delta i_{dj} \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$\begin{cases} \Delta P_{dc,j} = V_{dj} \Delta i_{dj} \\ \Delta z_{3j} = k_{i,dc,j} k_{dj} \int \Delta V_{dc,j} dt \\ \Delta z_{4j} = k_{i,dc,j} k_{pj} \int -\Delta P_{dc,j} dt \end{cases} \quad (10)$$

内环控制的线性化方程为:

$$\begin{cases} \Delta V_{c,dj} = k_{p,id,j} (\Delta i_{dj}^{\text{ref}} - \Delta i_{dj}) + \Delta z_{1j} - \omega L_{cj} \Delta i_{qj} \\ \Delta V_{c,qj} = -k_{p,iq,j} \Delta i_{qj} + \Delta z_{2j} + \omega L_{cj} \Delta i_{dj} \\ \frac{d\Delta z_{1j}}{dt} = -k_{i,id,j} k_{p,dc,j} k_{dj} \Delta V_{dc,j} + k_{i,id,j} \Delta z_{4j} + k_{i,id,j} \Delta z_{3j} - (k_{i,id,j} k_{p,dc,j} V_{dj} + k_{i,id,j}) \Delta i_{dj} \\ \frac{d\Delta z_{2j}}{dt} = -k_{i,iq,j} \Delta i_{qj} \\ \Delta z_{1j} = k_{i,id,j} \int (\Delta i_{dj}^{\text{ref}} - \Delta i_{dj}) dt \\ \Delta z_{2j} = k_{i,iq,j} \int (-\Delta i_{qj}) dt \end{cases} \quad (11)$$

联立式(7)一式(11),即可得到电压源型换流站的7阶线性化模型,然而考虑到本文的研究对象是柔性直流电网中的直流电压,其主要取决于电压源型换流站的外环控制环节<sup>[3]</sup>,而电流内环频率相对很高,对外环振荡模式的影响很小,可以认为其内环动态是理想的,有 $\Delta i_{dj}^{\text{ref}} = \Delta i_{dj}$ , $\Delta i_{qj}^{\text{ref}} = \Delta i_{qj}$ 。因此,图1中多个电压源型换流站的线性化方程可以写为:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta V_{dc} \\ \Delta i_d^{\text{ref}} \end{bmatrix} = A_{\text{vsc}} \begin{bmatrix} \Delta V_{dc} \\ \Delta i_d^{\text{ref}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta I_{dc} \quad (12)$$

式中: $V_{dc} = [V_{dc,1}, V_{dc,2}, \dots, V_{dc,N}]^T$ 为柔性直流电网中各个电压源型换流站端口的直流电压; $i_d^{\text{ref}} = [i_{d1}^{\text{ref}}, i_{d2}^{\text{ref}}, \dots, i_{dN}^{\text{ref}}]^T$ 为各个电压源型换流站中外环控制的输出变量; $C = \text{diag}(C_j)$ 为各个电压源型换流站直流侧的电容, $\text{diag}(\cdot)$ 表示将其中的元素构成对角化矩阵; $I_{dc} = [I_{dc,1}, I_{dc,2}, \dots, I_{dc,N}]^T$ 为原有柔性直流电网中各个电压源型换流站端口的注入直流电流,“ $\Delta$ ”表示状态变量所构成矢量矩阵的变化量。

## 1.2 柔性直流电网中直流线路的线性化模型

忽略柔性直流电网中线路的电感,其模型可写为 $\Delta I_{dc} = Y_{dc} \Delta V_{dc}$ , $Y_{dc}$ 为直流网络的导纳阵。

## 1.3 柔性直流电网的线性化互联模型

联立式(12)和直流网络的导纳阵,可得柔性直流电网的线性化模型为:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta V_{dc} \\ \Delta i_d^{\text{ref}} \end{bmatrix} = A_{\text{vsc}} \begin{bmatrix} \Delta V_{dc} \\ \Delta i_d^{\text{ref}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C} \\ 0 \end{bmatrix} Y_{dc} \Delta V_{dc} = A_d \begin{bmatrix} \Delta V_{dc} \\ \Delta i_d^{\text{ref}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: $A_{\text{vsc}}$ 和 $A_d$ 的具体表达式见附录A式(A1)和式(A2)。

具体地,在不同控制方式下,式(13)的传递函数模型如附录A图A1所示。不失一般性,假定当采用主从控制时,VSC1采用定直流电压控制,其余电压源型换流站采用定有功功率控制;当采用直流电压下垂控制时,VSC1和VSC2采用直流电压下垂控制,其余电压源型换流站采用定有功功率控制。变量定义如下。

$$\begin{cases} K_{dc,j} = \frac{k_{p,dc,j} k_{dj} V_{dj}^2 i_{dj} + k_{i,dc,j} k_{dj}}{(1 + k_{p,dc,j} k_{pj} V_{dj}) C_j V_{dc,j}^2} \\ K_{1,dc,j} = \frac{-k_{p,dc,j} k_{dj} V_{dj}}{(1 + k_{p,dc,j} k_{pj} V_{dj}) C_j V_{dc,j}^2} - k_{i,dc,j} k_{pj} V_{dj} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} F_{v1} = [1 & 0 & \dots & 0] \\ F_{v2} = [0 & 1 & 0 & \dots & 0] \\ \vdots \\ F_{vN} = [0 & \dots & 0 & 1] \end{cases} \quad (15)$$

式中:向量 $F_{vj}$ 的第 $j$ 个元素为1,其他 $N-1$ 个元素均为0。

附录A图A1中,共有2个组成部分,分别是柔性直流电网中的电压源型换流站和直流网络。其中,二阶振荡环节是柔性直流电网中的定直流电压控制电压源型换流站或者直流电压下垂控制电压源型换流站,二阶动态中一阶为电压源型换流站直流侧的电容,另一阶为电压源型换流站的外环控制。

对于附录A图A1(a)中主从控制下的柔性直流电网,只有定直流电压控制的电压源型换流站是二阶环节,剩余定有功功率控制的电压源型换流站是一阶环节,这说明在主从控制的柔性直流电网中,定有功功率控制电压源型换流站的控制环节并不会影响直流电压振荡模式的稳定性。对于图A1(b)中下垂控制下的柔性直流电网,下垂控制的电压源型换流站均为二阶环节,剩余定有功功率控制的电压源型换流站是一阶环节,这说明在下垂控制的柔性直流电网中,多个下垂控制电压源型换流站的控制环节都会对柔性直流电网中直流电压振荡模式的稳定性产生影响。对比图A1(a)和(b)可以得出,主从控制和下垂控制下,系统的结构框图大体相似,只是剩余柔性直流电网中某一个电压源型换流站的动态过



程从一阶(定有功功率控制)变为了二阶(定直流电压下垂控制)。这也说明对于定有功功率控制的电压源型换流站,其控制环节并不会影响到直流电压振荡模式的稳定性。

柔性直流电网中直流电压振荡模式的稳定性取决于柔性直流电网中二阶振荡模式的阻尼,如果其阻尼大于零则系统稳定,反之则系统失稳。所以研究外部环节对直流电压振荡模式稳定性的影响,关键在于研究其对柔性直流电网中二阶振荡模式阻尼的影响。从附录A图A1中可以看出,这一影响来源于2个部分,一部分来源于直流网络,另一部分来源于电压源型换流站。

## 2 虚拟阻尼分析

### 2.1 虚拟阻尼分析法的定义

传统阻尼转矩分析法常被用于分析交流系统的稳定性,尤其是功角稳定性。虽然它是一种用于单输入单输出系统的分析方法,但是因为其具有较明确的物理意义而得到众多学者的关注。本文的创新点之一在于将阻尼转矩分析法较为局限地应用并加以推广,拓展到了多端直流系统中,其分析对象仍然是针对单输入单输出系统。考虑到直流系统中并没有转矩这个物理量,所以本文命名为虚拟阻尼分析法。下面,本文将详细说明上述推广的正确性及其物理意义。

传统阻尼转矩分析的本质是将线路的有功功率 $\Delta P$ 在 $\Delta\delta$ - $\Delta\omega$ 坐标下分解为: $\Delta P = T_d\Delta\omega + T_k\Delta\delta$ 。其中: $T_d$ 为阻尼项,影响振荡模式的阻尼; $T_k$ 为同步项,影响振荡模式的频率。根据阻尼转矩分析法的结论,只有阻尼项 $T_d$ 会影响电力系统的稳定性<sup>[18]</sup>。显然,上述结论并不依赖于分析对象是发电机转子这一条件<sup>[19-20]</sup>,实际上,线路功率 $\Delta P$ 可以在任意一个相互垂直的坐标系 $\Delta x$ - $\Delta \dot{x}$ 下进行分解,其中与 $\Delta \dot{x}$ 成正比的系数称为阻尼项,会影响 $\Delta P$ 的阻尼,与 $\Delta x$ 成正比的系数称为同步项,不影响 $\Delta P$ 的阻尼。进一步,当扩展到不同的二阶系统中时,对于任意一个状态变量 $\Delta Y$ 均可以在任意垂直的坐标系 $\Delta x$ - $\Delta \dot{x}$ 下分解为如式(16)所示的形式。

$$\Delta Y = K_d\Delta \dot{x} + K_k\Delta x \quad (16)$$

式中: $\Delta x$ 为某一状态变量的变化量; $\Delta \dot{x}$ 为与 $\Delta x$ 相垂直的状态变量的变化量,同时也是 $\Delta x$ 导数的变化量; $K_d$ 为状态变量 $\Delta Y$ 的虚拟阻尼分量,会影响 $\Delta Y$ 的振荡阻尼; $K_k$ 为状态变量 $\Delta Y$ 的虚拟同步分量,影响 $\Delta Y$ 的振荡频率。

如附录B图B1所示,当虚拟阻尼分量 $K_d=0$ 时, $\Delta Y$ 在 $Y$ - $x$ 坐标系下的运动轨迹是一条直线,即 $\Delta Y = K_k\Delta x$ 。按照等面积法则,运行轨迹所形成的

加速面积和减速面积一致,振荡幅值不会衰减。这同时也说明了虚拟同步分量的确不会影响 $\Delta Y$ 的振荡阻尼。

如附录C图C1所示,当虚拟阻尼分量 $K_d>0$ 时, $\Delta Y$ 在 $Y$ - $x$ 坐标系下的运动轨迹将是一条曲线。按照等面积法则,运行轨迹所形成的加速面积和减速面积一致,自然有三角形边长 $a>b>c$ ,即振荡幅值会逐渐衰减。这同时也说明了虚拟阻尼分量的确会影响 $\Delta Y$ 的振荡阻尼。

### 2.2 电压源型换流站对直流电压振荡模式提供的虚拟阻尼分析

#### 2.2.1 虚拟阻尼的一般化计算方法

结合式(12)和附录A图A1可得出柔性直流电网中二阶振荡环节的动态方程为:

$$\begin{cases} (s^2 + D_1s + K_1)\Delta V_{dc,1} = C_1 - 1(s - K_{l,dc,1})\Delta I_{dc,1} \\ D_1 = \frac{V_{d1}i_{d1}}{C_1V_{dc,10}^2} + K_{l,dc,1} \\ K_1 = \frac{K_{dc,1}V_{d1}V_{dc,10} - V_{d1}i_{d1}K_{l,dc,1}}{C_1V_{dc,10}^2} \end{cases} \quad (17)$$

当 $\Delta I_{dc,1}=0$ 时,直流二阶振荡环节的振荡模式为方程 $s^2 + D_1s + K_1 = 0$ 的解。

假设VSCj的传递函数可以写为 $U_j(s) = \Delta I_{dc,1}/\Delta V_{dc,1}$ ,则考虑VSCj的全部动态过程后,柔性直流电网的状态方程将变为:

$$\begin{cases} s^2 + D_1s + K_1 + T(s) = 0 \\ T(s) = -C_1 - 1(s - K_{l,dc,1})U_j(s) \end{cases} \quad (18)$$

式(18)的解 $\bar{\lambda}_d = \epsilon_d + j\omega_d$ 即为考虑VSCj的全部动态过程后,柔性直流电网的振荡模式, $\epsilon_d$ 和 $\omega_d$ 分别为振荡模式的实部和虚部。

对于 $\bar{\lambda}_d$ ,在复频域有如下方程成立。

$$\bar{\lambda}_d^2 + D_1\bar{\lambda}_d + K_1 + T(\bar{\lambda}_d) = 0 \quad (19)$$

考虑到 $T(\bar{\lambda}_d)$ 将影响原有直流电压振荡模式的阻尼和频率,所以在复频域对 $T(\bar{\lambda}_d)$ 进行如下分解:

$$T(\bar{\lambda}_d) = T_d s + T_k = T_d \bar{\lambda}_d + T_k = T_d \epsilon_d + T_k + jT_d \omega_d \quad (20)$$

其中, $T_d$ 将改变原有振荡模式的阻尼,称之为VSCj向直流二阶振荡环节提供的虚拟阻尼分量, $T_k$ 将改变原有振荡模式的虚部,称之为VSCj向直流二阶振荡环节提供的虚拟同步分量,并有

$$\begin{cases} T_d = \frac{\text{Im}(T(\bar{\lambda}_d))}{\omega_d} \\ T_k = \text{Re}(T(\bar{\lambda}_d)) - \epsilon_d \frac{\text{Im}(T(\bar{\lambda}_d))}{\omega_d} \end{cases} \quad (21)$$

式中: $\text{Im}(\cdot)$ 和 $\text{Re}(\cdot)$ 表示取虚部和实部。

由式(21)可知VSCj接入不仅会影响柔性直流

电网原有振荡模式的阻尼,也会影响其振荡模式的频率,其影响大小取决于 $T_d$ 和 $T_k$ 的数值。

### 2.2.2 VSC<sub>j</sub>控制环节对柔性直流电网中振荡模式提供的虚拟阻尼

由附录A图A1可知,电压源型换流站之间,以及电压源型换流站与直流网络之间均存在着耦合关系,直接求VSC<sub>j</sub>控制环节对柔性直流电网中振荡模式提供的虚拟阻尼较为复杂,所以本文采取了一种间接的求取方法,说明如下。

1)基本变量的表示及其计算过程如下。

结合式(12)和附录A图A1可得出任意一个电压源型换流站的动态方程可以表示为:

$$\begin{aligned} \Delta V_{\text{def}} = & F_{Vj} \left[ C_j \left( s - \frac{V_{dj} i_{dj0}}{C_j V_{\text{dc},j0}^2} \right) + \frac{V_{dj} K_{\text{dc},j}}{V_{\text{dc},j0} (s - K_{\text{I},\text{dc},j})} \right]^{-1} \Delta I_{\text{dc},j} = \\ & F_{Vj} \left[ C_j \left( s - \frac{V_{dj} i_{dj0}}{C_j V_{\text{dc},j0}^2} \right) + \frac{V_{dj} K_{\text{dc},j}}{V_{\text{dc},j0} (s - K_{\text{I},\text{dc},j})} \right]^{-1} F_{Vj}^T \Delta I_{\text{dc}} = \\ & H_j(s) \Delta I_{\text{dc}} \end{aligned} \quad (22)$$

特殊地,如果不考虑该电压源型换流站的控制环节,则上式将化简为:

$$\begin{aligned} \Delta V_{\text{def}} = & F_{Vj} \left( s C_j - \frac{V_{dj} i_{dj0}}{V_{\text{dc},j0}^2} \right)^{-1} \Delta I_{\text{dc},j} = \\ & F_{Vj} \left( s C_j - \frac{V_{dj} i_{dj0}}{V_{\text{dc},j0}^2} \right)^{-1} F_{Vj}^T \Delta I_{\text{dc}} = H_{j0}(s) \Delta I_{\text{dc}} \end{aligned} \quad (23)$$

2)计算未考虑VSC<sub>j</sub>的控制环节时,剩余电压源型换流站和直流网络向柔性直流电网中二阶环节提供的虚拟阻尼。

未考虑VSC<sub>j</sub>的控制环节时,剩余电压源型换流站和直流网络所构成的反馈环节为:

$$\begin{aligned} \Delta I_{\text{dc},1} = & F_{V1}^T \Delta I_{\text{dc}} = \\ & F_{V1}^T \frac{Y}{I - Y \left( \sum_{i=1, i \neq j}^n H_i(s) + H_{j0}(s) \right)} F_{V1} \Delta V_{\text{dc},1} = \\ & F_{s1}(s) \Delta V_{\text{dc},1} \end{aligned} \quad (24)$$

式中: $I$ 为单位矩阵; $Y$ 为直流网络的导纳矩阵。

联立式(21)和式(24)可求得剩余电压源型换流站和直流网络向柔性直流电网中二阶振荡环节提供的虚拟阻尼和虚拟同步分量分别为:

$$\begin{cases} T_{\text{ds}1} = \frac{\text{Im} \left( \frac{(K_{\text{I},\text{dc},1} - \bar{\lambda}_d) F_{s1}(\bar{\lambda}_d)}{C_1} \right)}{\omega_d} \\ T_{\text{ks}1} = \text{Re} \left( \frac{(K_{\text{I},\text{dc},1} - \bar{\lambda}_d) F_{s1}(\bar{\lambda}_d)}{C_1} \right) - \epsilon_d T_{\text{ds}1} \end{cases} \quad (25)$$

3)计算VSC<sub>j</sub>控制环节后,全部电压源型换流站和直流网络向柔性直流电网中二阶环节提供的虚拟阻尼。

此时,柔性直流电网中电压源型换流站的动态方程和直流网络不变,类比式(22)一式(24)可得VSC<sub>j</sub>的控制环节后,全部电压源型换流站和直流网络构成的反馈环节为:

$$\begin{aligned} \Delta I_{\text{dc},1} = & F_{V1}^T \Delta I_{\text{dc}} = F_{V1}^T \frac{Y}{I - Y \sum_{j=1}^N H_j(s)} F_{V1} \Delta V_{\text{dc},1} = \\ & F_s(s) \Delta V_{\text{dc},1} \end{aligned} \quad (26)$$

联立式(21)和式(26)可求得全部电压源型换流站和直流网络向柔性直流电网中二阶振荡环节提供的虚拟阻尼和虚拟同步分量分别为:

$$\begin{cases} T_{\text{ds}} = \frac{\text{Im}(-C_1 - 1(\bar{\lambda}_d - K_{\text{I},\text{dc},1}) F_s(\bar{\lambda}_d))}{\omega_d} \\ T_{\text{ks}} = \text{Re}(-C_1 - 1(\bar{\lambda}_d - K_{\text{I},\text{dc},1}) F_s(\bar{\lambda}_d)) - \epsilon_d T_{\text{ds}} \end{cases} \quad (27)$$

4)计算VSC<sub>j</sub>的控制环节向柔性直流电网中二阶环节提供的虚拟阻尼。

联立式(24)一式(26)可得VSC<sub>j</sub>控制环节构成的反馈环节为:

$$\begin{aligned} \Delta I_{\text{dc},1} = & F_{V1}^T \Delta I_{\text{dc}} = (F_s(s) - F_{s1}(s)) \Delta V_{\text{dc},1} = \\ & F_{s2}(s) \Delta V_{\text{dc},1} \end{aligned} \quad (28)$$

联立式(21)和式(28)可求得VSC<sub>j</sub>向柔性直流电网中二阶振荡环节提供的虚拟阻尼和虚拟同步分量分别为:

$$\begin{cases} T_{\text{ds}2} = \frac{\text{Im}(-C_1 - 1(\bar{\lambda}_d - K_{\text{I},\text{dc},1}) F_s(\bar{\lambda}_d))}{\omega_d} - \\ \frac{\text{Im}(-C_1 - 1(\bar{\lambda}_d - K_{\text{I},\text{dc},1}) F_{s1}(\bar{\lambda}_d))}{\omega_d} = T_{\text{ds}} - T_{\text{ds}1} \\ T_{\text{ks}2} = T_{\text{ks}} - T_{\text{ks}1} \end{cases} \quad (29)$$

### 2.2.3 VSC<sub>j</sub>控制环节对柔性直流电网稳定性的影响判据

对于柔性直流电网的稳定性来讲,更主要的是关注 $T_{\text{ds}2}$ 的数值。为此,本文基于上述原理,提出了较为简单的评估指标,能够反映VSC<sub>j</sub>的控制环节对柔性直流电网稳定性的影响优劣和大小。

如果 $T_{\text{ds}2} > 0$ ,则VSC<sub>j</sub>控制环节对柔性直流电网中二阶环节提供正的虚拟阻尼,柔性直流电网的稳定性得到了改善。反之,如果 $T_{\text{ds}2} < 0$ ,则VSC<sub>j</sub>控制环节对柔性直流电网中二阶环节提供了负的虚拟阻尼,柔性直流电网的稳定性减弱。特殊的,如果满足式(30),则柔性直流电网失稳。

$$-T_{ds2} > D_1 + T_{ds1} \quad (30)$$

式(30)也可写为:

$$T_{total} = T_{ds2} + D_1 + T_{ds1} < 0 \quad (31)$$

### 2.3 基于虚拟阻尼的多电压源型换流站参数优化方法

主从控制下柔性直流电网中直流电压振荡模式的稳定性主要由定直流电压控制的电压源型换流站决定,定有功功率电压源型换流站的控制参数并不会改变原有振荡模式在复平面的位置。因此,对于主从控制的柔性直流电网,只需调整其定直流电压源型换流站的控制参数即可。但是在下垂控制的柔性直流电网中,将有多个下垂电压源型换流站影响柔性直流电网的稳定性,为此,本文基于虚拟阻尼提出了一种适用于复杂多端柔性直流电网的参数优化调整方法,如图3所示。

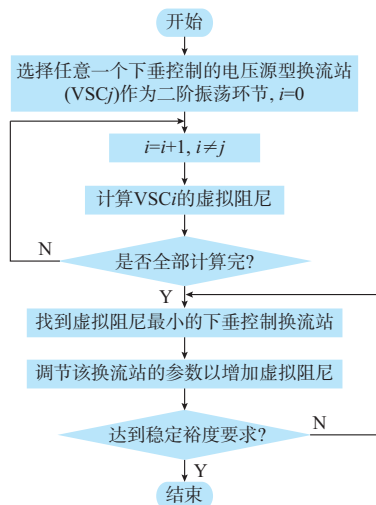


图3 虚拟阻尼指标用于优化控制参数的流程图  
Fig. 3 Flow chart of control parameter optimization based on virtual damping index

考虑到柔性直流电网中定功率控制的电压源型换流站控制参数并不会影响直流电压振荡模式的稳定性,所以图3中的参数优化方法主要针对的是多个下垂控制的电压源型换流站。其核心思想是,首先要调节柔性直流电网中提供虚拟阻尼最少的电压源型换流站,在同一稳定裕度的前提条件下,尽可能地降低虚拟阻尼在多个下垂控制电压源型换流站间的差异,以防止因为一个电压源型换流站退出运行而带来新的运行失稳问题。

## 3 案例验证

### 3.1 主从控制下的简单柔性直流电网

#### 3.1.1 柔性直流电网介绍

附录D图D1是一个简单三端柔性直流电网,系统参数如附录E表E1所示,电压源型换流站侧直流

电容均为3(标么值),风电场永磁同步发电机(PMSG)的模型及其控制参数参考文献[21],发电机的模型及其参数参考文献[18]。稳态时,VSC2和VSC3的输出电流分别为0.4和0.553(标么值)。

#### 3.1.2 虚拟阻尼分析的正确性验证

当柔性直流电网采用主从控制时,VSC2采用定直流电压控制,VSC1和VSC3采用定有功功率控制,电压源型换流站的控制参数如附录E表E2所示,此时柔性直流电网的振荡模式为: $\bar{\lambda}_d = -0.0298 + j0.2139$ (标么值),即 $(-11.26 + j80.66)$ rad/s。

首先,选定直流电压控制的电压源型换流站作为柔性直流电网中的二阶振荡环节,即

$$\begin{cases} s^2 + D_1 s + K_1 = 0 \\ D_1 = \frac{V_{d1} i_{d1}}{C_1 V_{dc,10}^3} + K_{I,dc,1} = -0.000333 \\ K_1 = \frac{K_{dc,1} V_{d1} V_{dc,10} - V_{d1} i_{d1} K_{I,dc,1}}{C_1 V_{dc,10}^2} = 0.1326 \end{cases} \quad (32)$$

然后,求得未考虑VSC3控制环节时,剩余系统构成的反馈环节为:

$$\Delta I_{dc,1} = F_s(s) \Delta V_{dc,1} =$$

$$F_{V1}^T \frac{Y}{I - Y(H_1(s) + H_{30}(s))} F_{V1} \Delta V_{dc,1} \quad (33)$$

由式(21)和式(33)可计算得出除VSC3控制环节外,剩余系统向柔性直流电网中二阶环节提供的虚拟阻尼和虚拟同步分量分别为:

$$\begin{cases} T_{ds1} = 0.0594 \\ T_{ks1} = -0.086 \end{cases} \quad (34)$$

接着,求得考虑VSC3控制环节后,全部电压源型换流站(VSC1和VSC3)和直流网络构成的反馈环节为:

$$\Delta I_{dc,1} = F_s(s) \Delta V_{dc,1} =$$

$$F_{V1}^T \frac{Y}{I - Y(H_1(s) + H_3(s))} F_{V1} \Delta V_{dc,1} \quad (35)$$

由式(21)和式(35)可计算得出全部电压源型换流站(VSC1和VSC3)和直流网络向柔性直流电网中二阶环节提供的虚拟阻尼和虚拟同步分量分别如式(36)所示。

$$\begin{cases} T_{ds} = 0.0594 \\ T_{ks} = -0.086 \end{cases} \quad (36)$$

最后,由式(34)和式(36)可计算得出VSC3控制环节向柔性直流电网中二阶环节提供的虚拟阻尼和虚拟同步分量分别为:

$$\begin{cases} T_{ds2} = T_{ds} - T_{ds1} = 0 \\ T_{ks2} = T_{ks} - T_{ks1} = 0 \end{cases} \quad (37)$$

可见,VSC3的控制环节不向系统中提供阻尼,



即对于定有功功率控制的电压源型换流站来讲,其控制环节不会影响到直流电网中直流电压的稳定性。采用虚拟阻尼指标进行判定,即  $T_{\text{total}} = T_{\text{ds2}} + D_1 + T_{\text{ds1}} = 0 + 0.0594 - 0.000333 > 0$ , 所以系统保持稳定。

为了验证上述分析结果,将式(34)或式(36)中的计算结果代入式(32)中,如式(38)所示。

$$s^2 + (D_1 + 0.0594)s - 0.086 + K_1 = 0 \quad (38)$$

式(38)的解为:  $\bar{\lambda}_d = -0.0298 + j0.2139$ , 与柔性直流电网中实际的振荡模式一致,验证了上述分解思想以及结论的正确性。

### 3.1.3 基于虚拟阻尼的电压源型换流站参数优化方法

对于主从控制的柔性直流电网,定功率控制的电压源型换流站控制环节并不影响其直流电压振荡模式的稳定性,只有定直流电压控制的电压源型换流站才会影响其振荡模式的阻尼,所以当柔性直流电网中振荡模式的阻尼不足时,应该选择调节定直流电压源型换流站的控制参数。

为验证上述分析结果,分别改变附录E表E3中VSC1和VSC2的控制参数,结果如表1所示。

表1 不同电压源型换流站参数变化对振荡模式的影响  
Table 1 Impact of parameters of different voltage source converter stations on oscillation mode

案例	$K_{p,dc,1}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$K_{p,dc,2}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$\lambda_d/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$
1	36.7	45.2	$-11.26 + j80.66$
2	36.7	56.5	$-13.1 + j80.48$
3	56.5	45.2	$-11.26 + j80.66$

由表1可知,主从控制下柔性直流电网中直流电压振荡模式的稳定性主要由定直流电压控制的电压源型换流站决定,定有功功率电压源型换流站的控制参数并不会改变原有振荡模式在复平面的位置。

对附录D图D1中的系统进行时域仿真,VSC1于0.1 s发生10%功率波动,0.2 s时恢复。表1中3个不同案例的仿真结果如附录F图F1所示。可见,当调节定功率电压源型换流站的参数时,系统的仿真曲线并不发生改变,但是当调节定直流电压控制的电压源型换流站时,系统的响应曲线发生了变化。这进一步证实了定有功功率电压源型换流站的控制参数并不会改变原有振荡模式。

## 3.2 下垂控制下的复杂柔性直流电网

### 3.2.1 柔性直流电网介绍

图4是一个复杂十端柔性直流电网,网络构架参考文献[22]中的系统,各个电压源型换流站的输

出功率和主要控制参数如附录E表E3所示。此时柔性直流电网的振荡模式为:  $\bar{\lambda}_d = 0.0097 + j0.3095$ ,可见柔性直流电网处于失稳状态,系统中电压源型换流站提供的虚拟阻尼不足。

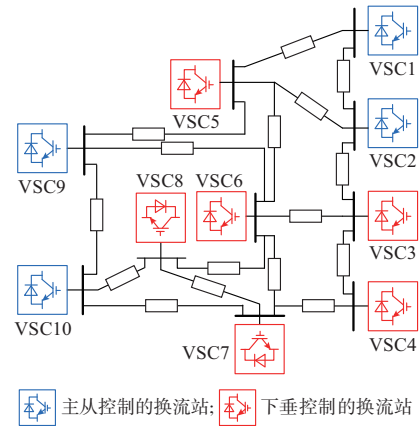


图4 复杂十端柔性直流电网  
Fig. 4 Ten-terminal complex flexible DC grid

### 3.2.2 每个电压源型换流站提供的虚拟阻尼计算

首先,选定阻尼为正的直流电压下垂控制电压源型换流站(VSC5)作为柔性直流电网中的二阶振荡环节,有

$$\begin{cases} s^2 + D_1 s + K_1 = 0 \\ D_1 = 0.1299 \\ K_1 = 0.1595 \end{cases} \quad (39)$$

然后类比于式(33)一式(37),分别求得电压源型换流站VSC1至VSC10控制环节向柔性直流电网中二阶振荡模式提供的虚拟阻尼,见表2。采用虚拟阻尼指标进行判定,  $T_{\text{total}} = -0.149 < 0$ ,所以系统失稳。

表2 不同电压源型换流站和直流网络为二阶振荡环节提供的虚拟阻尼(控制调整参数前)

Table 2 Virtual damping supplied to two-order oscillation loop from different voltage source converter stations and DC network (before controlling adjustment parameters)

虚拟阻尼		虚拟阻尼	
来源	数值	来源	数值
VSC1控制	0	VSC7控制	0.180
VSC2控制	0	VSC8控制	0.400
VSC3控制	0.710	VSC9控制	0
VSC4控制	0.810	VSC10控制	0
VSC6控制	0.130	全部VSC <sub>j</sub> 及直流网络	-0.149

作为验证,将-0.149代入式(39),可求得柔性直流电网中二阶振荡模式的阻尼部分为:  $\epsilon_d = -(0.1299 - 0.149)/2 \times 2\pi f \approx 3.6 \text{ rad/s}$ ,与实际模

式的实部一致,验证了上述计算结果的正确性。

### 3.2.3 基于虚拟阻尼的多电压源型换流站参数优化方法

按照图3中的参数优化流程,首先应选定二阶振荡环节并计算剩余电压源型换流站对该二阶环节提供的虚拟阻尼。这一部分计算已经在3.2.2节中完成,其结果见表2。然后,要调整虚拟阻尼最小的电压源型换流站,即VSC6,使得其提供的虚拟阻尼超过0.18,即超过VSC7提供的虚拟阻尼。此时,系统中虚拟阻尼最小的电压源型换流站将变为VSC7,所以调节目标更正为VSC7。此后,二者提供的虚拟阻尼将交替上升,当其超过0.4时,则按序调节VSC8,VSC3,VSC4,直到满足系统稳定性要求。

按上述流程调整后,柔性直流电网中的振荡模式变为 $\lambda_d = (-7.59 + j116.43)\text{rad/s}$ 。各电压源型换流站提供的虚拟阻尼如表3所示,其对应参数如附录E表E4所示。

表3 不同电压源型换流站和直流网络为二阶振荡环节提供的虚拟阻尼(控制调整参数后)

Table 3 Virtual damping supplied to two-order oscillation loop from different voltage source converter stations and DC network (after controlling adjustment parameters)

虚拟阻尼		虚拟阻尼	
来源	数值	来源	数值
VSC1		VSC7	0.330
VSC2		VSC8	0.370
VSC3	0.730	VSC9	
VSC4	0.800	VSC10	
VSC6	0.310	全部 VSC 及直流网络	-0.089

对图4中的系统进行时域仿真,VSC1于0.1 s发生10%功率波动,0.2 s恢复。柔性直流电网在参数调节前后的仿真结果见附录G。可见,按照表3中的参数对柔性直流电网调节后,电网恢复了稳定性。证明了表3中参数整定的有效性。

### 3.2.4 相比基于模式灵敏度调节方法的优势

在传统方法中,通常采用灵敏度调节法,常调节对阻尼灵敏度最大的参数,以期望能够在调节相同幅值的参数下获得更多的阻尼,这种方法虽然也可以恢复系统的稳定性,但是容易将虚拟阻尼集中在一个电压源型换流站中,当此电压源型换流站因故障退出运行后,系统将再次面临稳定性问题。相反,本文方法可以将虚拟阻尼在多个电压源型换流站中分摊,即使有一个电压源型换流站因故障退出运行,系统仍然能够在其他电压源型换流站的支撑下继续

稳定运行。

表4中给出了直流电压振荡模式对各个电压源型换流站参数 $k_{p,dc,i}$ 的灵敏度计算结果,可见调节VSC8的控制参数 $k_{p,dc,8}$ 能够在相同调节范围内获得更多的阻尼,通过将 $k_{p,dc,8}$ 调节为320,振荡模式由 $(3.64 + j116.69)\text{rad/s}$ 变为了 $(-4.92 + j113.55)\text{rad/s}$ 。

表4 振荡模式实部对 $k_{p,dc,i}$ 的灵敏度及调节结果  
Table 4 Sensitivity of real part of oscillation mode to  $k_{p,dc,i}$  and adjustment results

参数	灵敏度	参数	灵敏度
$k_{p,dc,3}$	0.017	$k_{p,dc,7}$	0.024
$k_{p,dc,4}$	0.017	$k_{p,dc,8}$	0.028
$k_{p,dc,6}$	0.023		

如表4所示,调节VSC8的控制参数使得柔性直流电网恢复稳定。但是当柔性直流电网中VSC8退出运行后,系统中的振荡模式将变为 $(4.75 + j125.40)\text{rad/s}$ ,系统将再次失稳。然而,当采用本文所提的基于虚拟阻尼的方法时,却不会发生再次失稳的现象。表5中列出了当采用本文方法时,不同电压源型换流站退出运行后柔性直流电网振荡模式的变化情况。

表5 不同电压源型换流站退出后振荡模式的变化情况  
Table 5 Changing situation of oscillation modes when different voltage source converter stations are quit

换流站	振荡模式/( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ )	换流站	振荡模式/( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ )
VSC3	$-3.70 + j111.12$	VSC7	$-6.80 + j114.79$
VSC4	$-0.58 + j107.52$	VSC8	$-5.69 + j113.78$
VSC6	$-6.82 + j115.14$		

由表5可知,当采用本文方法时,不论哪一个电压源型换流站退出运行,均不会影响到柔性直流电网振荡模式的稳定性,系统仍然能够稳定运行,验证了与传统基于灵敏度的调节方法相比,本文方法对电压源型换流站退出运行具有更好的抵抗能力。

图5中显示了当VSC8退出运行后,分别采用基于模式灵敏度调节方法和基于虚拟阻尼的调节方法的系统运行曲线,VSC1于0.1 s发生10%功率波动,0.2 s时恢复。可见,采用基于模式灵敏度调节方法后,当VSC8退出运行,系统将发生振荡现象,但是采用基于虚拟阻尼的调剂方法后,系统仍然保持稳定。

## 4 结语

本文针对柔性直流电网,采用虚拟阻尼分析法研究了单个电压源型换流站对柔性直流电网中直流



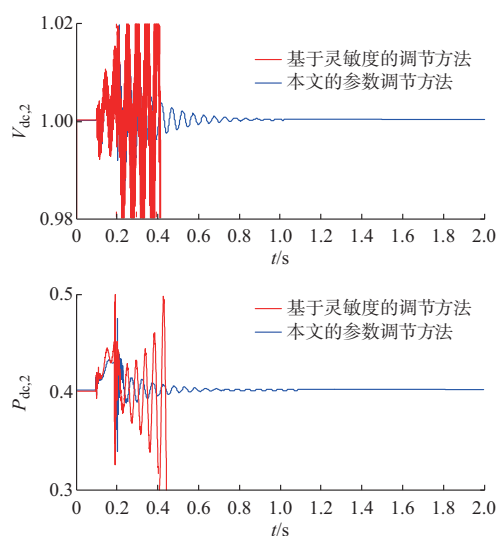


图5 2种不同调节方法下柔性直流电网的仿真结果  
Fig. 5 Simulation results of flexible DC grid with two different tuning methods of parameters

电压振荡模式稳定性的影响,主要有以下结论。

1)定有功功率控制的电压源型换流站控制参数不会影响到柔性直流电网中直流电压振荡模式的阻尼,所以对于主从控制的柔性直流电网来讲,其振荡模式的稳定性主要取决于定直流电压控制的电压源型换流站。

2)对于下垂控制的柔性直流电网来讲,采用直流电压下垂控制的电压源型换流站均会影响到柔性直流电网中振荡模式的阻尼。

3)虚拟阻尼可以反映柔性直流电网中任意一个结构对直流电压振荡模式阻尼的影响大小,可以用来分析柔性直流电网中的潜在风险。

4)基于虚拟阻尼的电压源型换流站参数优化方法能够更加均匀地分配电压源型换流站间提供的虚拟阻尼,从而提升了柔性直流电网在某一电压源型换流站退出运行时的稳定性。

由于本文的研究重点侧重于直流系统本身,所以假定交流系统为无穷大系统。在未来研究中,将进一步考虑交流系统的动态过程,探究交直流系统间动态交互过程对直流系统稳定性的影响,拓宽虚拟阻尼分析方法的适用范围。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

## 参考文献

[1] 陈霞,林卫星,孙海顺,等.基于多端直流输电的风电并网技术[J].电工技术学报,2011,26(7):60-67.

CHEN Xia, LIN Weixing, SUN Haishun, et al. LCC-MTDC technology for wind farms integration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 60-67.

[2] DU W, FU Q, WANG H. Subsynchronous oscillations caused by open-loop modal coupling between VSC-based HVDC line and power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 3664-3677.

[3] 徐政.柔性直流输电系统[M].北京:机械工业出版社,2014.  
XU Zheng. Flexible HVDC system[M]. Beijing: China Machine Press, 2014.

[4] 汤广福.基于电压源换流器的高压直流输电系统[M].北京:中国电力出版社,2010.  
TANG Guangfu. HVDC system based on voltage source converter[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.

[5] DU W, FU Q, WANG H. Small-signal stability of an AC/MTDC power system as affected by open-loop modal coupling between the VSCs[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3143-3152.

[6] 王成山,罗凤章,张天宇,等.城市电网智能化关键技术[J].高电压技术,2016,42(7):2017-2027.  
WANG Chengshan, LUO Fengzhang, ZHANG Tianyu, et al. Review on key technologies of smart urban power network[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2017-2027.

[7] BIANCHI F, DOMÍNGUEZ-GARCÍA J, GOMIS-BELLMUNT O. Control of multi-terminal HVDC networks towards wind power integration: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 55: 1055-1068.

[8] 付强,杜文娟,黄登一,等.含虚拟同步发电机的多端柔性直流系统稳定性分析[J].电力系统自动化,2018,42(9):164-170.  
FU Qiang, DU Wenjuan, HUANG Dengyi, et al. Stability analysis of multi-terminal flexible DC system with virtual synchronous generators [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 164-170.

[9] 李霞林,郭力,王成山.微网主从控制模式下的稳定性分析[J].电工技术学报,2014,29(2):24-34.  
LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan. Stability analysis in a master-slave control based microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 24-34.

[10] 李梅航,刘喜梅,陈朋.适用于多端柔性直流输电系统的快速电压裕度控制策略[J].电网技术,2016,40(10):3045-3051.  
LI Meihang, LIU Ximei, CHEN Peng. Fast voltage margin control strategy for VSC-MTDC systems[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3045-3051.

[11] 罗永捷,李耀华,王平.多端柔性直流输电系统下垂控制P-V特性曲线时域分析[J].电工技术学报,2014,29(增刊1):408-415.

LUO Yongjie, LI Yaohua, WANG Ping. Time-domain analysis of P-V characteristic for droop control strategy of VSC-MTDC transmission system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(Supplement 1): 408-415.

[12] KALCON O, ADAM G, ANAYA-LARA O, et al. Small-signal stability analysis of multi-terminal VSC-based DC transmission systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 29(4): 1818-1830.

[13] CHAUDHURI N, MAJUMDER R, CHAUDHURI B.

- Stability analysis of VSC MTDC grids connected to multimachine AC systems [C]// 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 22-26, 2012, San Diego, USA.
- [14] SHEN L, WANG W, BARNES M. The influence of MTDC control on DC power flow and AC system dynamic responses [C]// 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition, July 27-31, 2014, National Harbor, USA.
- [15] BEERTEN J, COLE S, BELMANS R. Modeling of multi-terminal VSC HVDC systems with distributed DC voltage control [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 34-42.
- [16] WANG Z, LI K, REN J. Coordination control strategy of voltage source converter based MTDC for offshore wind farms [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(4): 2743-2752.
- [17] NDREKO M, VAN DER MEER A, GIBESCU M. Impact of DC voltage control parameters on AC/DC system dynamics under faulted conditions [C]// 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition, July 27-31, 2014, National Harbor, USA.
- [18] 杜文娟,王海风. 电力系统低频功率振荡阻尼转矩分析理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2015.  
DU Wenjuan, WANG Haifeng. Theory and method of damping torque analysis for low frequency oscillation of power system [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [19] WANG H. Applications of damping torque analysis to STATCOM control [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2000, 22(3): 197-204.
- [20] 任必兴, 杜文娟, 王海风. 并网统一潮流控制器影响系统机电振荡模式的阻尼转矩分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(17): 18-24.  
REN Bixing, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Damping torque analysis of electromechanical oscillation modes for power system affected by grid-connected UPFC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 18-24.
- [21] LI S, HASKEW T. Optimal and direct-current vector control of direct-driven PMSG wind turbines [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(5): 2325-2337.
- [22] CHAUDHURI N, MAJUMDER R, CHAUDHURI B. System frequency support through multi-terminal DC (MTDC) grids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 347-356.
- 付 强(1993—), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 新能源电力系统分析与控制。E-mail: 1197348393@qq.com  
杜文娟(1979—), 女, 通信作者, 教授, 主要研究方向: 电力系统稳定性分析与控制。E-mail: ddwenjuan@qq.com  
王海风(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统稳定性分析与控制。E-mail: hfwang60@qq.com
- (编辑 鲁尔姣)

## Analysis of Small-signal Stability for Flexible DC Grid Based on Virtual Damping Index

FU Qiang<sup>1</sup>, DU Wenjuan<sup>2</sup>, WANG Haifeng<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources

(North China Electric Power University), Beijing 102206, China;

2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

**Abstract:** In recent years, flexible DC grid attracts a lot of attentions and develops fast, whose stability is the important premise to make the hybrid AC/DC power system operate normally. Aiming at the flexible DC grid, the linearized model of voltage source converter (VSC) station and the flexible DC grid with different control methods is established, and the interaction model of flexible DC grid is established, which takes oscillation mode of DC voltage in the flexible DC grid as analysis target. Based on this, a virtual damping analysis method with more clear physical meaning is proposed, and its concept and principle are introduced. Then, virtual damping index which can evaluate the influence of VSC station control on the stability of flexible DC grid is proposed, and the impact of VSC on the oscillation mode of DC voltage with different control methods is quantitatively analyzed. Furthermore, based on the virtual damping index, a coordinated optimization method for the control parameters of VSC stations in flexible DC grid is proposed, which improves the small-signal stability of the DC grid. Finally, taking a three-terminal flexible DC grid as an example, the calculation method of virtual damping in VSC stations is presented in detail. And the effectiveness of parameter optimization method in multiple VSC stations and the advantages of the method compared with the traditional parameter optimization method is verified in the complex ten-terminal flexible DC grid with droop control.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2016YFB0900602) and State Grid Corporation of China (No. 52094017000W).

**Key words:** voltage source converter (VSC) station; flexible DC grid; virtual damping analysis; small-signal stability

