

# 多端柔性直流输电控制引发的 开环模式谐振及其传播

付强, 杜文娟\*, 王海风

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

## Open-loop Modal Resonance and Propagation of VSC-MTDC With Different Control

FU Qiang, DU Wenjuan\*, WANG Haifeng

(State Key Laboratory of Alternate Electric Power Systems with New Energy Resources (North China Electric Power University),  
Changping District, Beijing 102206, China)

**ABSTRACT:** Open-loop modal resonance and propagation of multi-terminal voltage source converter based HVDC with different control systems was studied based on multi-terminal AC/DC hybrid power system in this paper. Concluded that when the droop control is used, the possibility of open-loop modal resonance will be improved, and the open-loop modal resonance will be more widespread. Specifically, the closed-loop linearized model of multi-terminal AC/DC hybrid power system with different DC network control strategy such as master-slave control and droop control was established. The mechanism and propagation characteristic of Open-loop modal resonance was analyzed and presented. The impact on small signal stability of AC/DC hybrid power system was evaluated. Finally, the correctness of the above analysis and conclusions were verified by taking the multi terminal AC/DC hybrid power system as an example.

**KEY WORDS:** multi-terminal voltage source converter based HVDC (VSC-MTDC); control strategy; open-loop model resonance mechanism; small signal stability

**摘要:** 针对多端交直流混联电力系统, 研究不同直流网控制策略引起的开环模式谐振及其传播方向, 发现直流电压下垂控制将增加开环模式谐振的发生概率, 扩大谐振的传播范围, 对交直流混联电力系统的稳定性产生不利影响。该文建立交直流混联电力系统分别在主从控制、下垂控制等不同直流网控制策略下的闭环线性化模型, 分析并揭示开环模式谐振的产生机理和传播特性。然后, 评估不同控制策略对交直流混联电力系统小干扰稳定性的影响。最后, 以 CIGRE5 端交直流混联电力系统为例, 验证上述分析和结论的正确性, 提出消除谐振的参数调节方法。

**关键词:** 多端柔性直流输电; 控制策略; 开环模式谐振机理; 小干扰稳定性

## 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>[1-3]</sup>, 柔性直流输电(voltage source converter based HVDC, VSC-HVDC)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广泛推广<sup>[4-6]</sup>, 由其拓展而成的多端柔性直流输电(multi-terminal voltage source converter based HVDC, VSC-MTDC)更被认为是解决风电场并网最有效的方式<sup>[7]</sup>, 成为构建未来智能电网的关键技术<sup>[8]</sup>, 得到国内外的大力发展<sup>[9-10]</sup>。

VSC-MTDC 系统中直流网的控制方式主要有 3 种, 主从控制、裕度控制和下垂控制。其中主从控制是最简单的控制方式<sup>[11]</sup>, 在正常运行模式下, 主换流站控制直流电压, 其余换流站控制有功功率; 对于小干扰稳定性研究, 裕度控制的特性与主从控制一致<sup>[12]</sup>, 均是在同一时刻只有一个换流站参与直流电压控制, 其余换流站参与定有功功率控制; 直流电压下垂控制是近几年来研究较为广泛的控制方式<sup>[13]</sup>, 实现多个换流站同时参与直流电压的控制, 提升直流电压的稳定能力。

关于多端交直流混联电力系统小干扰稳定性的研究, 目前多集中在多端直流系统接入同一交流系统对稳定性的影响。例如, 文献[14]建立多端直流系统接入同一交流网后混联系统的线性化模型, 研究主从控制参数对混联系统小干扰稳定性的影

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0900602)。

The National Key Research and Development Program of China (2016YFB0900602).

响,给出合理参数的选取意见。文献[15]采用模式分析法,分析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[16]采用时域仿真法,分析对比电压控制和下垂控制对交流系统稳定性的不同影响,得出直流系统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式提出新的控制方式,研究其对同一交流系统稳定性的影响<sup>[17-18]</sup>。但是对于多端柔性直流系统连接多个独立交流系统的稳定性研究,目前成果较少。文献[19]采用时域仿真法指出采用下垂控制的多端直流系统会传播独立交流系统间的扰动,这不仅证明直流系统的控制方式会参与交流系统之间的动态响应,也体现出下垂控制的直流系统并不能实现独立交流系统之间的解耦,然而上述文献并未进行进一步深入分析,也没有解释其内在机理。

综上,VSC-MTDC系统接入对交流系统小干扰稳定性影响的研究仍面临以下问题及挑战。

1) 不同控制下多端直流系统对多个独立交流系统动态特性的影响分析不够全面,缺少统一分析和普适性结论。

2) VSC-MTDC连接多个独立交流系统间的耦合关系研究主要集中在仿真计算层面,相应的机理研究进展缓慢。

3) 直流电压下垂控制引入新的动态交互过程,实现对直流电压的多点控制,但是对其带来的潜在威胁研究不足,交直流混联电力系统的稳定性仍面临着重大挑战。

针对目前多端交直流混联电力系统中面临的上述问题及挑战,本文在文献[19]的基础上进行深入研究,首先建立多端交直流混联电力系统的闭环线性化互联模型,其次分析不同直流控制策略引起的开环模式谐振及其传播特性,最后以CIGRE5端交直流混联电力系统为例,验证上述分析和结论的正确性,提出消除谐振的参数调节方法。

## 1 多端柔性交直流混联电力系统的线性化模型

### 1.1 系统介绍

如图1所示为 $N$ 端交直流混联电力系统的结构示意图,每个VSC换流站均连接一个独立交流系统, $C_j$ 和 $V_{jdc}$ 分别为第 $j$ 个VSC换流站(VSC- $j$ ),

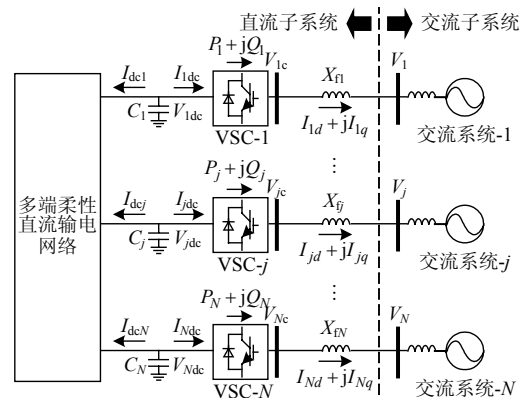


图1 多端交直流混联电力系统的示意图

Fig. 1 Diagram of multi-terminal AC/DC hybrid power system

$j=1,2,\dots,N$ )直流侧的电容和电压, $I_{dcj}$ 和 $I_{jdc}$ 分别为VSC- $j$ 直流侧电容的输入和输出电流, $P_j$ 和 $Q_j$ 分别为VSC- $j$ 输出的有功功率和无功功率, $V_j$ 和 $X_{j\bar{}}$ 分别为VSC- $j$ 交流侧的交流电压和连接电抗, $I_{jd}$ 和 $I_{jq}$ 分别是VSC- $j$ 交流侧的 $d$ 轴电流和 $q$ 轴电流。

以图1中虚线为分界点,采用分块建模法,首先将 $N$ 端交直流混联电力系统分为多个独立交流子系统(交流系统- $j$ , $j=1,2,\dots,N$ )和一个 $N$ 端直流子系统,然后针对各个子系统进行单独建模,得到子系统的开环线性化模型,最后以子系统间的输入输出变量为接口,将多个开环系统进行拼接,联立求得交直流混联电力系统的闭环线性化模型。

### 1.2 多个独立交流子系统的开环线性化模型

对于图1中的每个独立交流子系统- $j$ ,均可以把VSC- $j$ 的输入功率 $P_j+jQ_j$ ( $j=1,2,\dots,N$ )作为交流子系统- $j$ 的输入变量,把交流子系统- $j$ 的节点电压 $V_j$ ( $j=1,2,\dots,N$ )作为输出变量,得出交流子系统- $j$ 的线性化模型如式(1)所示。

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\Delta X_{acj} = A_{acj}\Delta X_{acj} + b_{pj}\Delta P_j + b_{qj}\Delta Q_j \\ \Delta V_j = c_{acj}^T\Delta X_{acj} + d_{pj}\Delta P_j + d_{qj}\Delta Q_j \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\Delta$ 表示状态变量的变化量; $\Delta X_{acj}$ ( $j=1,2,\dots,N$ )是交流子系统- $j$ 状态变量形成的矩阵。将式(1)写为传递函数的形式,有:

$$\begin{cases} \Delta V_j = g_{pj}(s)\Delta P_j + g_{qj}(s)\Delta Q_j \\ g_{pj}(s) = c_{acj}^T(sI - A_{acj})^{-1}b_{pj} + d_{pj} \\ g_{qj}(s) = c_{acj}^T(sI - A_{acj})^{-1}b_{qj} + d_{qj} \end{cases} \quad (2)$$

通过式(2),建立以VSC- $j$ 输入功率 $P_j+jQ_j$ 为输入变量,以交流系统- $j$ 的电压幅值 $V_j$ 为输出变量

的交流子系统开环线性化模型。

### 1.3 多端直流子系统的开环线性化模型

与上述交流子系统对应,图 1 中也形成了以交流系统- $j$  的电压幅值  $V_j(j=1,2,\dots,N)$  作为输入变量, VSC- $j$  输入功率  $P_j+jQ_j(j=1,2,\dots,N)$  作为输出变量的多端直流开环子系统,下面针对直流系统中不同控制方式的开环线性化模型进行分析。

#### 1.3.1 主从控制

在小干扰稳定性研究中,不涉及到 VSC 换流站的故障及其切换,所以主从控制和裕度控制具有相同的控制过程和特性,均是在同一时刻有且只有一个换流站参与控制直流电压。不失一般性,本文均以主从控制为例进行分析讨论,假定 VSC-1 采用定直流电压控制, VSC- $j(j=2,3,\dots,N)$  采用定有功功率控制,其控制框图如图 2、3 所示。

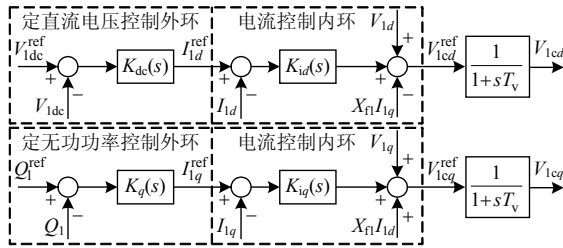


图 2 定直流电压控制的控制框图

Fig. 2 Configuration of DC voltage control

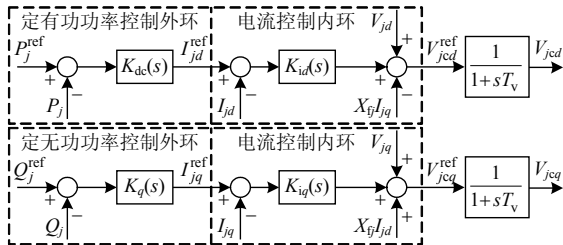


图 3 定有功功率控制的控制框图

Fig. 3 Configuration of active power control

图 2、3 中,  $K_{dc}(s)$ 、 $K_{id}(s)$ 、 $K_q(s)$ 、 $K_{iq}(s)$  是各个环节的比例积分(proportion integration, PI)控制参数,并采用一阶延时环节  $1/(1+sT_v)$  代表换流站的调制环节,但是考虑到调制环节导致的延时较小,可认为  $V_{jcd}$ 、 $V_{jq}$  能够瞬时跟踪  $V_{jcd}^{ref}$ 、 $V_{jq}^{ref}$  [4]。

对于 VSC- $j(j=1,2,\dots,N)$ , 其交直流连接线路上总有式(3)成立。

$$\begin{cases} X_{ij} \frac{dI_{jd}}{dt} = \omega_0 (\Delta V_{jcd} - \Delta V_{jd}) + \omega_0 X_{ij} \Delta I_{jq} \\ X_{ij} \frac{dI_{jq}}{dt} = \omega_0 (\Delta V_{jq} - \Delta V_{jcd}) - \omega_0 X_{ij} \Delta I_{jd} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $V_{jcd}$  和  $V_{jq}$  分别是  $V_{jc}$  的  $d$  轴和  $q$  轴分量;  $V_{jd}$  和  $V_{jq}$  分别是  $V_j$  的  $d$  轴和  $q$  轴分量。依据图 2、3 的控制方式和式(3),可得出定直流电压控制和定有功功率控制的传递函数如式(4)所示[4]。

$$\begin{cases} \Delta I_{1d} = G_{p1}(s) \Delta V_{1dc} \\ \Delta I_{1q} = G_{q1}(s) \Delta Q_1 \\ \begin{cases} \Delta I_{jd} = G_{pj}(s) \Delta P_j \\ \Delta I_{jq} = G_{qj}(s) \Delta Q_j \end{cases}, & j = 2, 3, \dots, N \\ \begin{cases} G_{pj}(s) = \frac{\omega_0 K_{id}(s) K_{dc}(s)}{sX_{ij} + \omega_0 K_{id}(s)} \\ G_{qj}(s) = \frac{\omega_0 K_{iq}(s) K_q(s)}{sX_{ij} + \omega_0 K_{iq}(s)} \end{cases}, & j = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (4)$$

假设换流站中锁相环(phase locked loop, PLL)控制环节是理想的,选择  $V_j$  的方向与其  $d$  轴重合,则有  $V_{jd} = V_j$ ,  $V_{jq} = 0(j=1,2,\dots,N)$ , 则 VSC- $j$  输入功率  $P_j+jQ_j$  的线性化模型可写为

$$\begin{cases} \Delta P_j = I_{jd0} \Delta V_j + V_{j0} \Delta I_{jd} = V_{jdc0} \Delta I_{jdc} + I_{jdc0} \Delta V_{jdc} \\ \Delta Q_j = -I_{jq0} \Delta V_j - V_{j0} \Delta I_{jq} \end{cases}, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

其中下角标 0 代表状态变量的稳态值。进一步地,考虑到直流输电网络的线路模型,有:

$$\begin{cases} P_j = V_{jdc} I_{jdc} = V_{jdc} (-C_j \frac{dV_{jdc}}{dt} - I_{dcj}) \\ \frac{dI_{dcj}}{dt} = \sum_{i=1}^N y_{ji} V_{idc} \end{cases}, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

式(6)线性化可得:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P \end{bmatrix} = W(s) \begin{bmatrix} \Delta V_{1dc} \\ \Delta V_{dc} \end{bmatrix} + U \begin{bmatrix} \Delta I_{dc1} \\ \Delta I_{dc} \end{bmatrix} \\ s \begin{bmatrix} \Delta I_{dc1} \\ \Delta I_{dc} \end{bmatrix} = Y(s) \begin{bmatrix} \Delta V_{1dc} \\ \Delta V_{dc} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

式中  $Y(s)$  是直流网络的导纳阵。

$$\begin{cases} \Delta P = [\Delta P_2 \quad \Delta P_3 \quad \dots \quad \Delta P_N]^T \\ \Delta V_{dc} = [\Delta V_{2dc} \quad \Delta V_{3dc} \quad \dots \quad \Delta V_{Ndc}]^T \\ \Delta I_{dc} = [\Delta I_{dc2} \quad \Delta I_{dc3} \quad \dots \quad \Delta I_{dcN}]^T \\ W(s) = - \begin{bmatrix} I_{1dc0} + sC_1 V_{1dc0} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & I_{Ndc0} + sC_N V_{Ndc0} \end{bmatrix} \\ U = - \begin{bmatrix} V_{1dc0} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & V_{Ndc0} \end{bmatrix} \end{cases}$$

对式(7)求解可得:

$$\Delta V_{1dc} = \sum_{i=1}^N f_{1i}(s) \Delta P_i \quad (8)$$

最后, 将式(4)和式(8)带入式(5)可求得直流子系统的开环线性化模型如式(9)所示, 其输入变量为  $V_j$ , 输出变量为  $P_j + jQ_j$ 。

$$\begin{cases} \Delta P_1 = \sum_{i=1}^N h_{1i}(s) \Delta V_i \\ \Delta P_j = h_{pj}(s) \Delta V_j, & j = 2, 3, \dots, N \\ \Delta Q_j = h_{qj}(s) \Delta V_j, & j = 1, 2, \dots, N \\ h_{11}(s) = \frac{I_{1d0}}{1 - V_{10} G_{p1}(s) f_{11}(s)} \\ h_{1j}(s) = \frac{V_{10} G_{p1}(s) \sum_{j=2}^N f_{1j}(s) h_{pj}}{V_{10} G_{p1}(s) f_{11}(s)}, & j = 2, 3, \dots, N \\ h_{pj}(s) = \frac{I_{jd0}}{1 - V_{j0} G_{pj}(s)}, & j = 2, 3, \dots, N \\ h_{qj}(s) = \frac{-I_{jq0}}{1 + V_{j0} G_{qj}(s)}, & j = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (9)$$

### 1.3.2 直流电压下垂控制

与主从控制不同, 直流电压下垂控制(下文简称下垂控制)中可以实现多个换流站同时参与直流电压的控制, 如图4所示。不失一般性, 假设 VSC- $j$  ( $j=1, 2$ )采用直流电压下垂控制, 其余换流站仍然采用定有功功率控制。

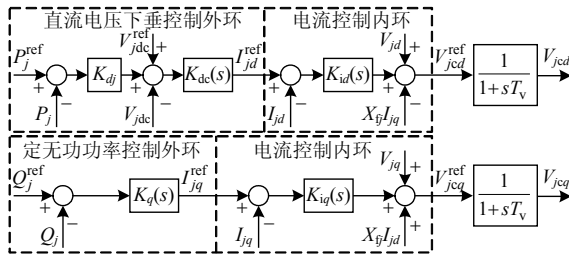


图4 直流电压下垂控制的控制框图

Fig. 4 Configuration of DC voltage droop control

由图4和式(3)可得出直流电压下垂控制换流站的传递函数如式(10)所示。

$$\begin{cases} \Delta I_{jd} = G_{pj}(s) (K_{dj} \Delta P_j + \Delta V_{jdc}) \\ \Delta I_{jq} = G_{qj}(s) \Delta Q_j \end{cases}, \quad j = 1, 2 \quad (10)$$

考虑到如式(6)所示的直流输电网络线路模型, 则有:

$$\Delta V_{jdc} = \sum_{i=1}^N f_{ji}(s) \Delta P_i, \quad j = 1, 2 \quad (11)$$

类似地, 将式(11)和(10)带入式(5)可求得直流子系统的开环线性化模型如式(12)所示, 其输入变量为  $V_j$ , 输出变量为  $P_j + jQ_j$ 。

$$\begin{cases} \Delta P_j = \sum_{i=1}^N h_{ji}(s) \Delta V_i, & j = 1, 2 \\ \Delta P_j = h_{pj}(s) \Delta V_j, & j = 3, 4, \dots, N \\ \Delta Q_j = h_{qj}(s) \Delta V_j, & j = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (12)$$

### 1.4 多端交直流混联电力系统的闭环线性化模型

联立1.2节交流子系统的开环线性化模型式(2)和1.3节直流子系统的开环线性化模型式(9)或(12), 可得出不同直流控制方式下交直流混联电力系统的闭环线性化模型, 并说明如下。

#### 1.4.1 主从控制

以变量  $V_j$  和  $P_j + jQ_j$  为交直流子系统间的接口, 联立式(2)和(9), 可得出交直流混联电力系统在主从控制下的闭环线性化模型, 如图5所示。

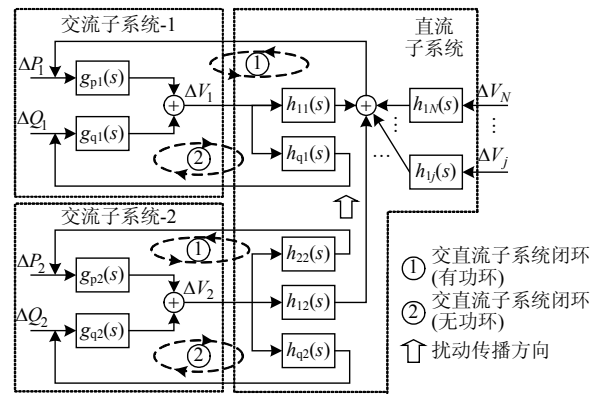


图5 交直流混联电力系统的闭环线性化模型(主从控制)

Fig. 5 Interconnected linearized model of the VSC MTDC/AC power system (master-slave control)

由图5可知, 在主从控制的交直流混联电力系统中, 共形成了两种类型的闭环, 一种是换流站有功控制环节与交流子系统间形成的闭环①, 另一种是换流站无功控制环节与交流子系统间形成的闭环②。说明直流系统中换流站的控制环节与交流系统间存在耦合, 可能会产生不利于交直流系统稳定性的相互作用, 这一内容将在第2节详细论证。

图5中, 扰动传播方向是单向的, 只能从定有功功率换流站(VSC- $j$ ,  $j=2, 3, \dots, N$ )向定直流电压换流站(VSC-1)传播, 而定直流电压换流站侧交流系统的扰动无法传播到其它独立交流系统中。说明当直流系统采用主从控制时, 独立交流系统间扰动的传播方向是单向的, 独立交流系统间不存在耦合关系, 也不会产生相互作用。所以, 对于主从控制的

交直流混联系统, 耦合现象(即闭环)是局部的, 只存在于换流站与其连接的交流子系统间, 独立交流系统间是相互独立的。

#### 1.4.2 直流电压下垂控制

以变量  $V_j$  和  $P_j + jQ_j$  为交直流子系统间的接口, 联立式(2)和式(12), 可得出交直流混联电力系统采用定直流电压下垂控制的闭环线性化模型, 如图 6 所示。

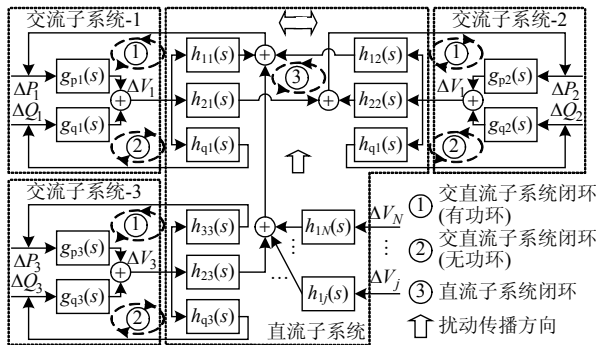


图 6 交直流混联电力系统的闭环线性化模型(下垂控制)

Fig. 6 Interconnected linearized model of the VSC MTDC/AC power system (voltage-droop control)

由图 6 可知, 在下垂控制的交直流混联电力系统中, 共形成三种类型的闭环, 除和图 5 中一样的闭环①和闭环②外, 还有直流子系统内换流站与换流站控制环节间形成的闭环③。说明直流系统中不仅存在着换流站控制环节与交流系统间的耦合, 也存在这换流站与换流站控制之间的耦合。

由于下垂控制的换流站间形成了闭环, 所以图 6 下垂控制的换流站间扰动传播方向是双向的, 可以从任意一个下垂控制的换流站及其连接的交流系统传播到其它下垂控制的换流站及其连接的交流系统。但是, 剩余换流站由于采用定有功功率控制, 其扰动的传播方向与图 5 一样, 仍是单向的。所以, 对于下垂控制的交直流混联系统, 耦合现象(即闭环)是全局的, 不仅仅存在于换流站与其连接的交流子系统间, 还存在于下垂控制的换流站间以及其连接的独立交流系统间。

综上, 对于不同控制下的多端柔性交直流混联电力系统, 有以下主要结论:

1) 主从控制的交直流混联电力系统中, 扰动从定功率换流站侧交流系统向定直流电压换流站侧交流系统呈现单向传播, 独立交流系统间没有耦合, 但是交直流子系统间存在耦合, 并形成多个交直流子系统闭环。

2) 直流电压下垂控制的交直流混联电力系统中, 扰动在下垂控制换流站侧交流系统间呈现双向传播, 不仅交直流子系统间存在耦合, 形成多个交直流子系统闭环, 而且下垂控制换流站连接的独立交流系统间也存在耦合, 形成新的直流子系统闭环。

## 2 开环模式谐振及其传播

依据图 5、6 中的分析结果, 多端交直流混联电力系统中子系统间有以下几种基本的连接方式。

图 7(a)代表子系统间的连接是串联的, 扰动从一个子系统向另一个子系统间呈现单向传播, 例如子系统 A 可以代表定有功控制换流站及其连接的独立交流系统, 子系统 B 可以代表定直流电压控制换流站及其连接的独立交流系统。该系统的稳定性取决于开环子系统的稳定性, 如果开环子系统是稳定的, 则闭环子系统就是稳定的。图 7(b)代表子系统间是并联的, 扰动传播均为单向, 且不存在相互影响, 例如子系统 A 和 B 可以代表定有功控制换流站及其连接的独立交流系统。该系统的稳定性也取决于开环子系统的稳定性, 如果开环子系统是稳定的, 则闭环子系统就是稳定的。图 7(c)代表子系统间形成了闭环, 其扰动的传播是双向的, 存在耦合和相互作用, 例如图 5、6 中的①、②和③。该系统的稳定性不仅仅取决于开环子系统的稳定性, 还和子系统间的动态交互作用有关系。如果子系统间的动态交互作用较强, 例如发生开环模式谐振, 即使子系统开环稳定, 其对应的闭环互联系统仍然会面临失稳的风险, 是本文研究的主要对象。

不失一般性, 本文以图 8 所示的互联子系统为例进行分析, 验证当子系统之间的开环模式接近时, 子系统间将发生开环模式谐振, 引起子系统间

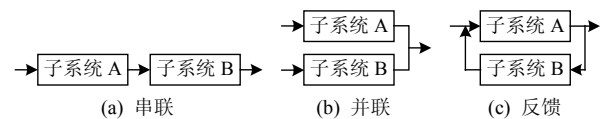


图 7 子系统间的基本连接方式

Fig. 7 Base connections between subsystems

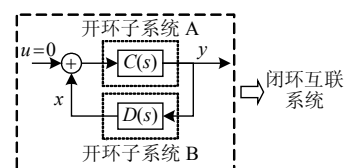


图 8 闭环互联系统

Fig. 8 Closed interconnected system

的强动态交互作用,导致闭环模式排斥,严重时将引发系统的稳定性问题。

如图8所示,  $C(s)$ 代表子系统A的开环传递函数,开环模式为  $\lambda_c$ ,  $D(s)$ 代表子系统B的开环传递函数,开环模式为  $\lambda_d$ 。闭环互联系统的模式  $\hat{\lambda}_c$  和  $\hat{\lambda}_d$  可由式(13)求得。

$$C(s)D(s)=1 \quad (13)$$

式(13)可进一步展开为

$$\left[\frac{R_c}{s-\lambda_c} + \sum_{i=1}^m \left(\frac{R_{mi}}{s-\lambda_i}\right)\right] \left[\frac{R_d}{s-\lambda_d} + \sum_{k=1}^n \left(\frac{R_{nk}}{s-\lambda_k}\right)\right] = 1 \quad (14)$$

式中:  $R_c$ 、 $R_d$  分别为开环模式  $\lambda_c$  和  $\lambda_d$  对应的留数;  $R_{mi}$ 、 $R_{nk}$  分别为其余开环模式  $\lambda_i$  和  $\lambda_k$  对应的留数。当子系统的开环模式接近,即  $\lambda_c \approx \lambda_d$  时,式(14)可化为

$$\left[R_c + (s-\lambda_c) \sum_{i=1}^m \left(\frac{R_{mi}}{s-\lambda_i}\right)\right] \left[R_d + (s-\lambda_c) \cdot \sum_{k=1}^n \left(\frac{R_{nk}}{s-\lambda_k}\right)\right] = (s-\lambda_c)^2 \quad (15)$$

在开环模式  $\lambda_c$  附近,即  $\hat{\lambda}_c \rightarrow \lambda_c$ , 有:

$$(s-\lambda_c)^2 = R_c R_d \quad (16)$$

求解式(16)可得当子系统开环模式接近时,对应的闭环模式为

$$\begin{cases} \hat{\lambda}_c \approx \lambda_c \pm \sqrt{R_c R_d} \\ \hat{\lambda}_d \approx \lambda_d \pm \sqrt{R_c R_d} \end{cases} \quad (17)$$

由式(17)可得,当子系统的开环模式接近时,互联系统的闭环模式会发生排斥现象,导致系统的阻尼降低,当  $|\text{real}(\sqrt{R_c R_d})| > \min(|\text{real}(\lambda_c)|, |\text{real}(\lambda_d)|)$  时系统失稳,称为开环模式谐振。

结合图7可知,开环模式谐振的发生需要满足两个条件:1) 子系统间能够形成闭环;2) 子系统间的开环模式相互接近。所以对于主从控制,结合图5可知,多端交直流混联电力系统会形成多个交直流子系统闭环,当定直流电压换流站的开环模式与交流系统的开环模式接近时,会发生开环模式谐振,谐振传播方向与扰动传播方向一致,由定功率换流站向定直流电压换流站单向传播。对于下垂控制,结合图6可知,多端交直流混联电力系统会形成多个交直流子系统闭环和直流子系统闭环,当任意一个下垂控制换流站的开环模式与交流系统的开环模式接近或者与另一下垂换流站的开环模式

接近时,会发生开环模式谐振,谐振传播方向与扰动传播方向一致,在下垂控制的换流站间呈现双向传播,而在剩余换流站间呈现单向传播。

与主从控制相比,直流电压下垂控制形成了更多的子系统闭环,增加了开环模式谐振发生的概率,且为双向传播,进一步扩大了谐振的影响范围。所以采用直流电压下垂控制的多端交直流混联电力系统将面临更大的潜在风险。

### 3 案例验证

#### 3.1 系统介绍

如图9所示为5端交直流混联电力系统的结构示意图,系统线路参考CIGRE5端直流<sup>[20]</sup>中的参数,发电机采用文献[21]中的6质量块模型及其参数,风机采用文献[22]中的定转子转速控制及其参数,换流站参考文献[23-24]中的参数。稳态时换流站1~3的输入功率分别为3.43、1、1pu。不失一般性,当采用主从控制时,VSC-1采用定直流电压控制,其余采用定有功功率控制;当采用下垂控制时,VSC-1和VSC-2采用直流电压下垂控制,下垂系数为0.1,VSC-3采用定有功功率控制。具体参数见附表A1及A2。

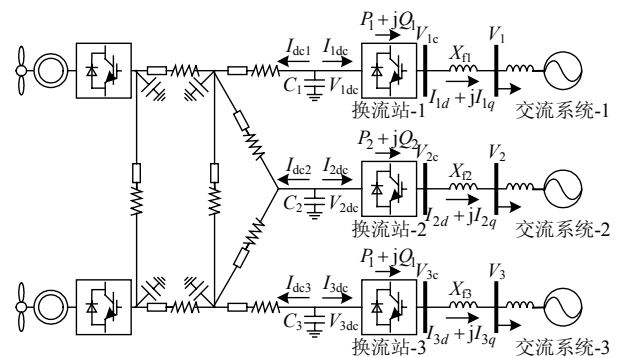


图9 5端交直流混联电力系统

Fig. 9 5 terminal AC/DC hybrid power system

#### 3.2 直流系统中的开环模式谐振及其消除方法

由图5、6可知,主从控制的直流系统没有形成直流子系统闭环,所以即使换流站的开环模式接近,也不会发生开环模式谐振。但是下垂控制的直流系统形成了直流子系统闭环,当换流站的开环模式接近时会发生开环模式谐振,有可能威胁混联系统的稳定性。下面以图9系统为例,验证上述的分析结论。

如表1所示,给出了系统中换流站的开环、闭环振荡模式,换流站的控制参数见表A2。

表 1 换流站的开、闭环振荡模式

Tab. 1 Open-loop modes and closed-loop modes of VSCs			
控制方式	换流站 VSC- <i>i</i>	开环模式 $\lambda_{vhi}/(\text{rad/s})$	闭环模式 $\hat{\lambda}_{vhi}/(\text{rad/s})$
主从控制	VSC-1	$-11.2 + j226.8$	$-11.2 + j226.8$
	VSC-2	$-1.9 + j226.5$	$-1.9 + j226.5$
	VSC-3	$-6.5 + j180.3$	$-6.5 + j180.3$
下垂控制	VSC-1	$-12.1 + j227.5$	$-15.8 + j235.6$
	VSC-2	$-4.2 + j226.8$	$0.2 + j223.3$
	VSC-3	$-6.5 + j180.3$	$-6.5 + j180.3$

由表 1 可知, 当下垂控制换流站间的开环模式接近时, 其闭环模式将发生较大的排斥现象导致系统失稳, 但是对于主从控制而言, 即使换流站的开环模式接近, 闭环模式也不会发生偏移现象。由此可知, 当下垂控制换流站的开环模式接近时, 换流站之间由于耦合作用产生了较强的动态交互, 发生率开环模式谐振, 导致了闭环模式排斥并失稳。而主从控制的换流站间由于不存在直流系统内的闭环, 子系统间没有交互作用, 所以不会发生直流网内部的换流站开环谐振现象。

为了进一步论证上述分析过程及结果, 对表 1 中的模式  $\hat{\lambda}_{vh2}$  进行参与性分析, 如图 10 所示。

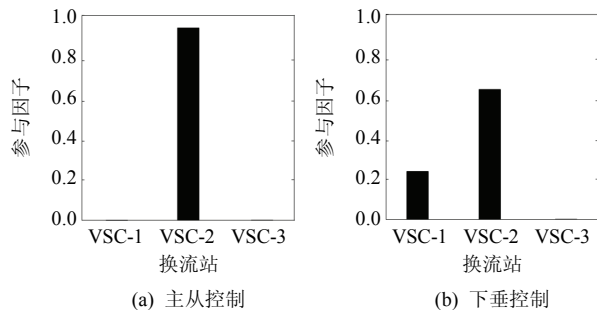
图 10 不同控制下模式  $\hat{\lambda}_{vh2}$  的参与性分析

Fig. 10 Participation of modes with different control

图 10 中, 为了简单明了地突出对比结果, 仅保留了分析对象(VSC-*j*, *j*=1,2,3)的参与性, 删除交流系统、风机、线路等其它状态变量的参与性。此外, 考虑到每个 VSC 均含有多个状态变量, 所以采取了求和的形式进行了展示, 即图 10 中 VSC-*j* 表示 VSC-*j* 中全部状态变量的参与性因子之和。类似地, 下文中参与因子的处理方式与此相同。

如图 10(a)所示, 采用主从控制时  $\hat{\lambda}_{vh2}$  的参与性中只有 VSC-2 中的状态变量, VSC-1 和 VSC-3 的状态变量均未参与, 证明定直流电压换流站和定有功功率换流站间不存在耦合, 没有交互产生。

如图 10(b)所示, 当直流系统采用下垂控制时,

$\hat{\lambda}_{vh2}$  的参与性不仅有 VSC-2 的状态变量, 还有 VSC-1 的状态变量。证明在下垂控制下, VSC-1 和 VSC-2 之间存在耦合关系, 产生了动态交互作用。此外, 还可以发现 VSC-3 并没有参与上述谐振, 这进一步证明了定有功功率换流站不参与 VSC 之间动态交互的结论。

为了验证上述线性化分析的正确性, 对图 9 系统进行了时域仿真, 控制参数如表 1 所示。系统于 0.1s 在节点  $V_1$  处发生了 20% 的负荷波动, 持续 0.1s 后恢复, 如图 11 所示。

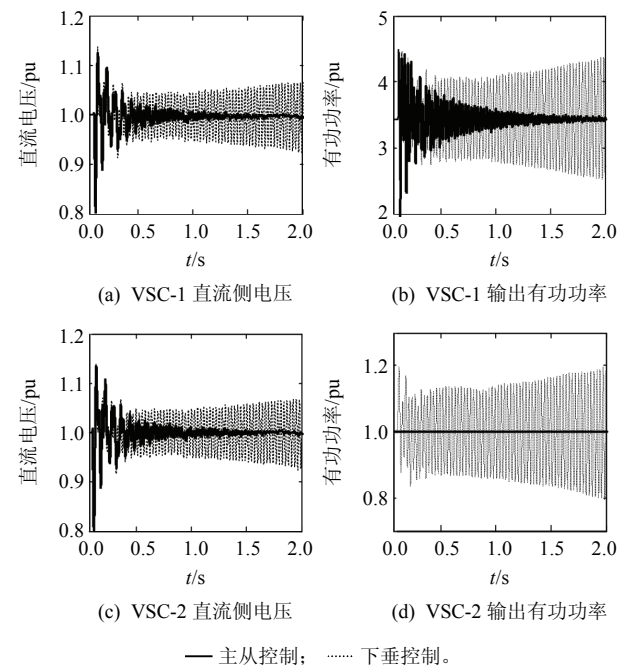


图 11 时域仿真结果

Fig. 11 Time domain simulation results

由图 11 可得, 当下垂控制换流站间的开环模式接近时, 会发生开环模式谐振, 并在下垂控制的换流站及其连接的独立交流系统间呈现双向传播, 引起直流系统和交流系统的失稳。但是主从控制的直流系统则不会发生开环模式谐振, 始终保持稳定运行, 验证了上述分析结果。

进一步地, 依据开环模式谐振产生的机理, 给出了通过调节参数来消除谐振的方法, 具体说明如下。

开环模式谐振的产生需要具备两个基本条件, 即子系统闭环和开环模式接近。对于前者可通过改变控制方式来破坏子系统之间的闭环, 例如将下垂控制改为主从控制。后者则可以通过调节控制参数方式使得开环模式相互远离, 如图 11(b)所示, 调节 VSC-1 的内环积分系数  $k_{ii}$  由 14.4 到 25pu, 或者由



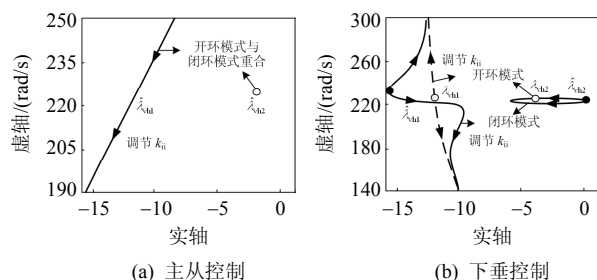


图12 不同控制下模式的根轨迹

Fig. 12 Trace of modes with different control

14.4 到 5pu, 可以发现随着  $\hat{\lambda}_{vh1}$  逐渐远离  $\hat{\lambda}_{vh2}$ , 闭环模式  $\hat{\lambda}_{vh1}$ 、 $\hat{\lambda}_{vh2}$  (图中实线所示, 下同) 逐渐与开环模式  $\lambda_{vh1}$ 、 $\lambda_{vh2}$  (图中虚线所示, 下同) 重合,  $\hat{\lambda}_{vh2}$  也会趋于稳定, 谐振最终消失。对于主从控制, 由于没有形成子系统闭环, 模式之间不会产生交互影响, 随着内环积分系数  $k_{ii}$  由 10 到 8pu, 始终有  $\hat{\lambda}_{vh1} = \lambda_{vh1}$ ,  $\hat{\lambda}_{vh2} = \lambda_{vh2}$ , 如图 11(a) 所示。

最后, 为了验证上述线性化分析的正确性, 对图 11(b) 中  $k_{ii}=5pu$  的运行情况进行了时域仿真。系统于 0.1s 在节点  $V_1$  处发生 20% 的负荷波动, 持续 0.1s 后恢复, 如图 13 所示, 系统稳定性得到恢复。

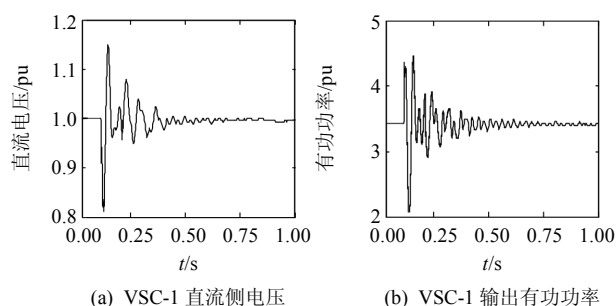


图13 谐振消除后时域仿真结果

Fig. 13 Time domain simulation results with no resonance

### 3.3 交直流子系统间的开环谐振及其传播方向

由图 5、6 可知, 主从控制和下垂控制的混联系统中均形成了交直流子系统闭环, 故均有可能产生开环模式谐振, 但其传播方向并不一致。考虑到外环积分系数  $k_{pi}$  与内环积分系数  $k_{ii}$  之间的比例关系<sup>[22]</sup>,  $k_{pi}=0.3k_{ii}$ , 当内环积分系数  $k_{ii}$  在 25~5pu 之间调节时, 外环积分系数  $k_{pi}$  将位于 7.5~1.5pu, 此时换流站外环振荡模式的根轨迹如图 14 所示。

图 14(a) 和 (b) 分别代表主从控制和下垂控制下, VSC-1 外环控制模式和交流系统机电模式随参数  $k_{pi}$  变化的根轨迹。当  $k_{pi}=2.5pu$ , 主从控制中 VSC-1 外环控制的开环模式  $\lambda_{vl1}$  与交流系统机电开环模式  $\lambda_{sg1}$  接近, 发生了开环模式谐振, 导致交流

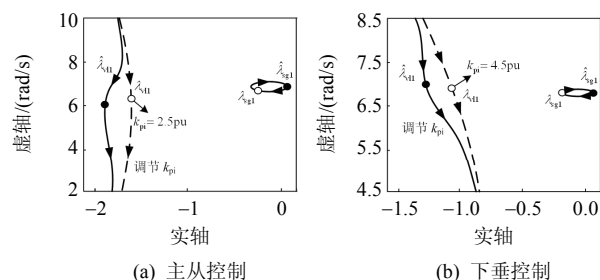


图14 不同控制下模式的根轨迹

Fig. 14 Trace of modes with different control

系统闭环模式  $\hat{\lambda}_{sg1}$  失稳, 随着参数的进一步变化, 开环模式  $\lambda_{vl1}$  与  $\lambda_{sg1}$  相互远离, 谐振消失; 同理, 当  $k_{pi}=4.5pu$  时, 下垂控制中 VSC-1 外环控制的开环模式  $\lambda_{vl1}$  与交流系统机电开环模式  $\lambda_{sg1}$  接近, 发生开环模式谐振, 导致交流系统模式  $\hat{\lambda}_{sg1}$  失稳, 随着参数的进一步变化, 开环模式相互远离, 谐振消失。

具体地, 不同控制下交流系统机电模式  $\hat{\lambda}_{sg1}$  的参与性如图 15 所示。

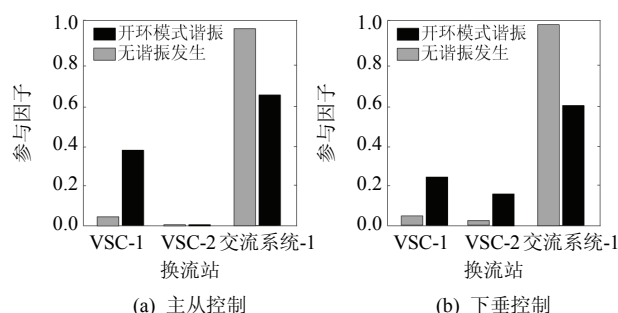
图15 不同控制下模式  $\hat{\lambda}_{sg1}$  的参与性分析

Fig. 15 Participation of modes with different control

由图 15 可知, 当系统间没有发生开环模式谐振时,  $\hat{\lambda}_{sg1}$  的参与性主要是交流系统中的状态变量, 直流状态变量的参与性很低, 说明交直流系统间的动态交互作用较弱。当两种控制方式均与交流系统发生开环模式谐振时, 二者在谐振时的参与性不同。对于主从控制, 谐振时  $\hat{\lambda}_{sg1}$  的参与性为 VSC-1 和交流系统-1 的状态变量, 但是对于下垂控制, 还增加了 VSC-2 的状态变量, 这说明了 VSC-2 与 VSC-1 和交流系统间存在交互作用, 谐振的影响范围较大。

为了验证上述开环模式谐振及其传播方向的正确性, 进行了如图 16、17 所示的时域仿真。图 16 中交流系统 1 侧于 0.1s 于节点  $V_1$  处发生 20% 负荷波动, 持续 0.1s 后恢复, 图 17 中交流系统 2 侧于 0.1s 于节点  $V_2$  处发生 20% 负荷波动, 持续 0.1s



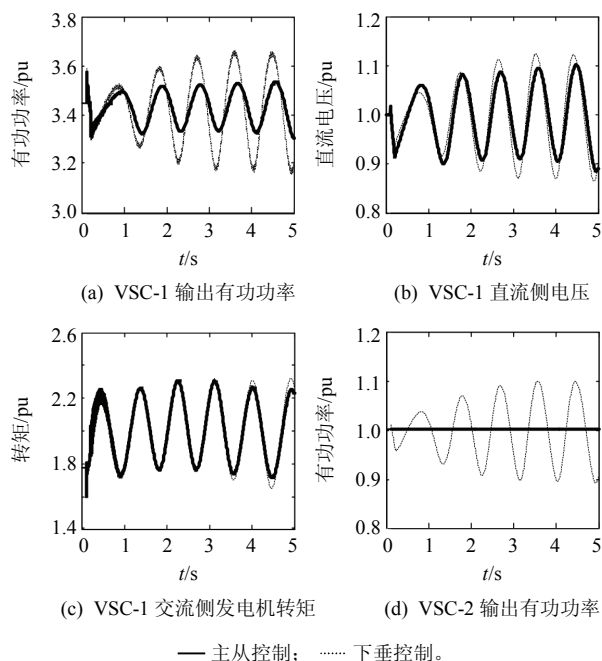


图 16 时域仿真结果(故障位于交流系统-1)

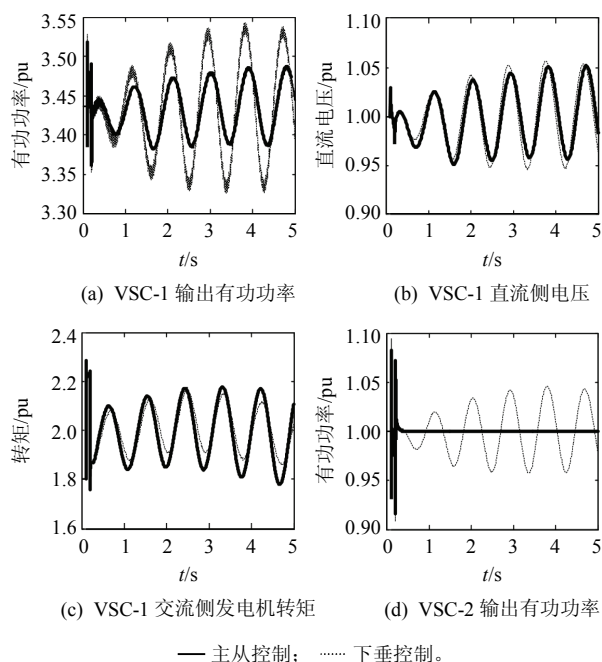
Fig. 16 Time domain simulation results  
(fault in AC system-1)

图 17 时域仿真结果(故障位于交流系统-2)

Fig. 17 Time domain simulation results  
(fault in AC system-2)

后恢复。由图 16、17 可知，主从控制下，交流系统-1 的故障和谐振不会传播到交流系统-2 中，但是交流系统-2 的故障可以传播到交流系统-1，证明谐振传播的单向性。下垂控制下，不论故障发生的位置，最终都会导致两个交流系统同时失稳，证明谐振传播的双向性。

综合上述分析，为了避免在多端交直流混联系统中发生开环模式谐振，应从以下两个方面采取抑制和解决措施：

1) 消除交直流子系统间的闭环。结合图 7 的论述，当换流站采用主从控制时，交直流系统间将不会形成闭环互联系统，从系统结构层面消除了开环模式发生的可能性。所以在满足需求的前提下，应避免在多端直流系统中大规模使用直流电压下垂控制策略。

2) 使子系统间的开环模式相互远离。依据第 3 小节的推论，即使交直流子系统形成了闭环，只要子系统间的开环模式相互远离，则不会发生开环模式谐振。所以当采用下垂控制时，应该预先设计换流站的控制参数，使其对应的开环模式远离交流系统和剩余直流系统中的开环模式，避免谐振的发生。

## 4 结论

本文通过建立多端交直流混联电力系统的闭环线性化互联模型，分析了不同直流控制策略引起的开环模式谐振及其传播特性，主要有以下结论。

1) 论证了当互联反馈子系统间的开环模式相互接近时，将发生开环模式谐振，导致闭环模式排斥并降低模式阻尼，严重时会影响到系统的稳定运行。

2) 得出采用主从控制的直流系统可能发生交直流子系统间的开环谐振，其传播方向从定有功功率换流站向定直流电压换流站单向传播。

3) 得出采用下垂控制的直流系统不仅会发生交直流子系统间的开环谐振还可能发生直流系统间的开环谐振，其传播方向在下垂控制换流站间呈现双向传播。

4) 比较了主从控制和下垂控制对交直流混联电力系统的稳定性影响，从谐振概率和传播范围两个方面得出下垂控制将会给系统稳定性带来更大的潜在威胁。

5) 提出了基于开环模式谐振机理的参数调节方法，为参数设计和谐振规避提供了简便、有效的途径。

6) 虽然以“开关”型换流站为例进行了建模研究，但是考虑到分析的重点集中在外环控制和内环控制等控制器对多端直流系统模式谐振及其传播的影响，所以在不考虑拓扑级动态特性的前提下，研究成果也可以在“可控电压源”型换流器中

得到推广。

## 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(in Chinese).
- [2] 邱晓燕, 沙熠, 宁雪姣, 等. 大规模风电接入的智能电网多类型柔性负荷分级优化调度[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2084-2091.  
Qiu Xiaoyan, Sha Yi, Ning Xuejiao, et al. Hierarchical optimization of multi-type flexible load in smart grid with large-scale wind generation[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2084-2091(in Chinese).
- [3] 陶佳, 丁腾波, 宁康红, 等. 智慧能源战略框架及全过程实施方案[J]. 发电技术, 2018, 39(2): 129-134.  
TAO Jia, DING Tengbo, NING Kanghong, et al. Strategy and Whole Course Implementation Schemes of Smart Energy [J]. Power Generation Technology, 2018, 39(2): 129-134.
- [4] 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(in Chinese).
- [5] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[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(in Chinese).
- [6] 李英彪, 梁军, 吴广禄, 等. 多电压等级直流电力系统发展与挑战[J]. 发电技术, 2018, 39(2): 118-128.  
LI Yingbiao, LIANG Jun, WU Guanglu, et al. Development and Challenge of DC Power System With Different Voltage Levels [J]. Power Generation Technology, 2018, 39(2): 118-128.
- [7] 文劲宇, 陈霞, 姚美齐, 等. 适用于海上风场并网的混合多端直流输电技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 55-61.  
Wen Jinyu, Chen Xia, Yao Meiqi, et al. Offshore wind power integration using hybrid multi-terminal HVDC technology[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 55-61(in Chinese).
- [8] 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(in Chinese).
- [9] Bianchi F D, Domínguez-García J L, 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.
- [10] 徐殿国, 刘瑜超, 武健. 多端直流输电系统控制研究综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(17): 1-12.  
Xu Dianguo, Liu Yuchao, Wu Jian. Review on control strategies of multi-terminal direct current transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(17): 1-12(in Chinese).
- [11] 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(in Chinese).
- [12] 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(in Chinese).
- [13] 罗永捷, 李耀华, 王平, 等. 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(S1): 408-415.  
Luo Yongjie, Li Yaohua, Wang Ping, et al. Time-domain analysis of P-V characteristic for droop control strategy of VSC-MTDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 408-415(in Chinese).
- [14] Kalcon G O, Adam G P, Anaya-Lara O, et al. Small-signal stability analysis of multi-terminal VSC-Based DC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1818-1830.
- [15] Chaudhuri N R, Majumder R, Chaudhuri B. Stability analysis of VSC MTDC grids connected to multimachine ac systems[C]//2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA: IEEE, 2012.
- [16] Shen L, Wang W, Barnes M. The influence of MTDC

control on DC power flow and AC system dynamic responses[C]//Proceedings of the 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition. National Harbor: IEEE, 2014.

[17] 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.

[18] Wang Zhuodi, Li Kejun, Ren Jingguo, et al. Coordination control strategy of voltage-source - converter-based MTDC for offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 51(4): 2743-2752.

[19] Ndreko M, van der Meer A A, Gibescu M, et al. Impact of DC voltage control parameters on AC/DC system dynamics under faulted conditions[C]//Proceedings of the 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition. National Harbor: IEEE, 2014.

[20] Rouzbehi K, Miranian A, Candela J I, et al. A generalized voltage droop strategy for control of multiterminal DC grids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(1): 607-618.

[21] Padiyar K R. Power system dynamics stability and control[M]. New York: Wiley, 1996.

[22] Li Shuhui, Haskew T A, Swatloski R P, et al. Optimal and direct-current vector control of direct-driven PMSG wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(5): 2325-2337.

[23] Chaudhuri N R, Majumder R, Chaudhuri B. System frequency support through multi-terminal DC (MTDC) grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 347-356.

[24] Harnefors L, Bongiorno M, Lundberg S. Input-admittance calculation and shaping for controlled voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(6): 3323-3334.

附录 A

表 A1 VSC-MTDC 的系统参数

Tab. A1 Main parameters of VSC-MTDC system

系统参数	数值	系统参数	数值
VSC 额定容量/MW	200	频率基值/Hz	50
额定直流电压/kV	300	电容 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ /pu	4
阻抗基值/ $\Omega$	225	直流电压参考值/pu	1
电容基值/ $\mu$ F	14.15	—	—

表 A2 VSC 的控制参数

Tab. A2 Main parameters of VSC control

章节	控制策略	VSC 编号	$K_{dc}(s)/pu$	$K_q(s)/pu$	$K_{id}(s)/pu$	$K_{iq}(s)/pu$
3.2	主从控制	1	1+7.5/s	2+0.13/s	4.17+9.5/s	2.5+10/s
		2	1+1.5/s	2+0.13/s	1.73+15/s	2.5+10/s
		3	1+1.5/s	2+0.13/s	3.5+10/s	2.5+10/s
	下垂控制	1	1+7.5/s	2+0.13/s	2.83+14.4/s	2.5+10/s
		2	1+3.5/s	2+0.13/s	1.73+15/s	2.5+10/s
		3	1+1.5/s	2+0.13/s	3.5+10/s	2.5+10/s
3.3	主从控制	1	1+2.5/s	2+0.13/s	4.17+9.5/s	2.5+10/s
		2	1+1.5/s	2+0.13/s	1.73+15/s	2.5+10/s
		3	1+1.5/s	2+0.13/s	3.5+10/s	2.5+10/s
	下垂控制	1	1+4.5/s	2+0.13/s	2.83+25/s	2.5+10/s
		2	1+3.5/s	2+0.13/s	1.73+15/s	2.5+10/s
		3	1+1.5/s	2+0.13/s	3.5+10/s	2.5+10/s



付强

收稿日期：2017-09-05。

作者简介：  
付强(1993)，男，博士研究生，主要研究方向为新能源电力系统分析与控制，1197348393@qq.com；  
\*通讯作者：杜文娟(1979)，女，教授，主要研究方向为电力系统稳定性分析与控制，ddwenjuan@qq.com；  
王海风(1961)，男，教授，博士生导师，主要研究方向为电力系统稳定性分析与控制，hfwang60@qq.com。

(编辑 邱丽萍)

# Open-loop Modal Resonance and Propagation of VSC-MTDC With Different Control

FU Qiang, DU Wenjuan\*, WANG Haifeng  
(North China Electric Power University)

**KEY WORDS:** multi-terminal voltage source converter based HVDC (VSC-MTDC); control strategy; open-loop model resonance mechanism; small signal stability

The research on small signal stability of multi terminal AC/DC hybrid power system is mainly focused on the stability of multi terminal DC system (MTDC) connected to an AC system. However, few studies have been done on the stability of multi terminal flexible DC systems with multiple independent AC systems. This paper analyzes the open-loop modal resonance and propagation of VSC-MTDC control based on the MTDC with multiple independent AC systems in literature [17].

Firstly, the closed-loop interconnected model of multi terminal AC/DC hybrid power system is established by combining multiple open-loop AC subsystem models as shown in (1) and an open-loop MTDC subsystem model as shown in (2) and (3). The difference between (2) and (3) is that (2) is established with master-slave control, however, (3) is established with DC voltage droop control.

$$\begin{cases} \Delta V_j = g_{pj}(s)\Delta P_j + g_{qj}(s)\Delta Q_j \\ g_{pj}(s) = \mathbf{c}_{acj}^T (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_{acj})^{-1} \mathbf{b}_{pj} + d_{pj} \\ g_{qj}(s) = \mathbf{c}_{acj}^T (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_{acj})^{-1} \mathbf{b}_{qj} + d_{qj} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Delta P_1 = \sum_{i=1}^N h_{i1}(s)\Delta V_i \\ \Delta P_j = h_{pj}(s)\Delta V_j, \quad j = 2, 3, \dots, N \\ \Delta Q_j = h_{qj}(s)\Delta V_j, \quad j = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \Delta P_j = \sum_{i=1}^N h_{ji}(s)\Delta V_i, \quad j = 1, 2 \\ \Delta P_j = h_{pj}(s)\Delta V_j, \quad j = 3, 4, \dots, N \\ \Delta Q_j = h_{qj}(s)\Delta V_j, \quad j = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (3)$$

In the closed-loop interconnected model, it can be found that the probability of open-loop modal resonance and the propagation direction of multi terminal AC/DC hybrid power system are different with master-slave control or DC voltage droop control, which is explained as follows:

$$\begin{cases} \hat{\lambda}_c \approx \lambda_c \pm \sqrt{R_c R_d} \\ \hat{\lambda}_d \approx \lambda_d \pm \sqrt{R_c R_d} \end{cases} \quad (4)$$

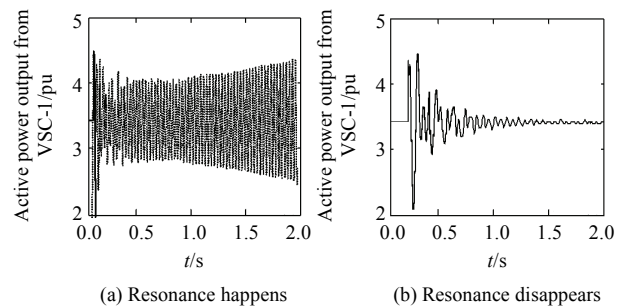
From (4), it can be concluded that the closed-loop modes will be excluded and lead to worse damping when the open-loop subsystem modes are close to each other,

which is called open-loop modal resonance. When the master slave control is used, the open-loop modal resonance will only occur between VSC station and AC power system, and the propagation is one-way. However, when the DC droop control is used, the open-loop modal resonance will not only occur between VSC station and AC power system but also between VSC stations with bi-directional propagation, which will lead to worse influences on the stability of multi terminal AC/DC hybrid power systems.

Tab. 1 shows that, when the open-loop modes are close to each other, the closed-loop modes will be excluded, leading to one of the closed loop modes instability; however, if the open-loop modes are far from each other, the closed loop modes will not move clearly. The time domain simulation results as shown in Fig. 1(a) verifies the above analysis. When open-loop modal resonance occurs, the damping of closed-loop will reduce, and the system will lose stability. Based on the above analysis, the open-loop modal resonance can disappear when open-loop modes keep away from each other by adjusting the parameters, which is verified by simulation results shown in Fig. 1(b).

**Tab. 1 Control parameters and modes of DC system**

Control method	VSC- <i>i</i>	Inner loop parameters	Open-loop modes	Closed-loop modes
Master slave control	VSC-1	4.17 + 9.5/s	-11.2 + j226.8	-11.2 + j226.8
	VSC-2	1.73 + 15/s	-1.9 + j226.5	-1.9 + j226.5
	VSC-3	3.5 + 10/s	-6.5 + j180.3	-6.5 + j180.3
DC voltage control	VSC-1	2.83 + 14.4/s	-12.1 + j227.5	-15.8 + j235.6
	VSC-2	1.73 + 15/s	-4.2 + j226.8	0.2 + j223.3
	VSC-3	3.5 + 10/s	-6.5 + j180.3	-6.5 + j180.3



**Fig. 1 Time domain simulation results**