

多端柔性直流接入对交流系统功角稳定性的影响

付强, 杜文娟, 王海风

(华北电力大学 电气与工程学院, 北京市 昌平区 102206)

Angular Stability of Power Systems Integrated With VSC-MTDC Grid

FU Qiang, DU Wenjuan, WANG Haifeng

(College of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University,
Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: This paper investigates small-signal angular stability of AC power system affected by an integrated multi-terminal DC (MTDC) network. An interconnected linearized model of AC/MTDC system is established. The model clearly shows that MTDC affects small-signal angular stability of AC system by introducing changes in dynamic interactions and load flow. Dynamic interactions are usually small according to damping torque analysis. Impact of load flow change brought by MTDC is the primary factor. Considering power flow change related to DC power injection and its location in AC system, this paper proposes following two ideas: 1. The DC power change is balanced by balance machine in AC system, so impact of DC power injection on AC system is equal to the impact of balance machine; 2. The impact of DC power injection on AC system may be smaller when location of DC system is near the balance machine with smaller power flow change. Above ideas, avoiding adverse effect on angular stability of AC system, are demonstrated and verified with calculation and simulation with New England System as an example.

KEY WORDS: power system small-signal angular stability; VSC-MTDC; damping torque analysis

摘要: 针对多端柔性直流电网(multi terminal direct current network based on voltage source converter, VSC-MTDC)接入对交流电力系统小干扰功角稳定性影响的问题。通过建立交直流混联系统的线性化互联模型, 采用分解的思想得到了 VSC-MTDC 接入主要在 2 个方面影响交流系统小干扰功角稳定性: 一是改变了交流系统的潮流, 二是与交流系统的动态交互作用。采用阻尼转矩分析的结果表明: 交直流系统之间动态交互的影响一般很小, 直流系统接入主要是改变了交流系统的潮流, 可等效为恒功率源进行研究。针对“潮流”部分的影响, 进一步分解为直流电网的注入功率和接入地点 2 个部分, 提出并研究了以下 2 个猜测: 1) 输入功率变化

等效于发电机出力改变, 二者对交流系统小干扰功角稳定性的影响是一致的; 2) 直流电网接入地点在平衡机附近时对交流系统小干扰功角稳定性造成的影响是较小的。以新英格兰系统为例, 通过计算和仿真演示验证了上述猜测, 并可借此避免多端柔性直流电网接入对交流电力系统小干扰功角稳定性的不利影响。

关键词: 小干扰功角稳定性; VSC-MTDC; 阻尼转矩分析

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2017.0944

0 引言

近年来, 由于多端柔性直流输电在多个方面展现出了明显的优越性^[1], 众多学者对多端柔性直流电网(multi terminal direct current network based on voltage source converter, VSC-MTDC)进行了研究, 包括潮流计算^[2-3]、建模^[4-5]、控制^[6-7]和保护^[8-9]等。针对交直流混联系统的稳定性, 目前的研究状况基本分为 2 类, 一类是研究直流电网自身的稳定性问题^[10-11], 另一类是研究交直流混联系统整体的稳定性问题^[8-12]。

文献[10]使用模态分析法分析了多端直流自身的小干扰稳定性, 文献[11]进一步对直流电网中多个换流站之间的交互进行了详细和深入的研究。上述研究结果也为独立分析直流电网的稳定性提供了一定的借鉴。对于交直流混联系统的稳定性问题, 目前的研究也分为 2 方面。第 1 方面是研究交直流混联系统中直流电网的稳定性问题, 例如文献[12-14]采用输入阻抗法分析了直流换流站之间的交互作用。第 2 方面是研究交直流混联系统中交流系统的稳定性问题。文献[15]通过建立交直流混联系统的状态空间模型, 分析了混联系统的小干扰稳定性, 并采用非线性仿真验证了上述结果的正确性。文献[16]对换流站提供的阻尼效果进行了分析, 并尝试得出具有一般性的结论, 但考虑到交直流混

联系统的复杂性,众多影响因素相互耦合,如果不采取有效的方法将其分解,这样的研究挑战性很大。

本文遵循上述第2个研究方向,研究了多端柔性直流接入对交流系统小干扰功角稳定性的影响。与现有研究成果相比,采用分解的方法将多端直流系统接入对交流系统小信号功角稳定性的影响分为了动态交互和潮流2部分,并分别进行研究,可以更加清晰地呈现上述不同部分对交流系统的影响大小,从而更有效地避免其带来的不利影响。首先,建立了交直流混联系统的线性化互联模型,对VSC-MTDC接入的影响进行了分析。结果表明,VSC-MTDC接入主要在2个方面影响交流系统小干扰功角稳定性,一方面是改变了交流系统的潮流,另一方面是与交流系统的动态交互作用。

然后,通过阻尼转矩分析,得出交直流混联系统间的动态交互作用一般很小,直流电网可以近似等效为恒定功率源接入,故其影响也可以近似等效为接入恒定功率源对交流系统小干扰功角稳定性的影响。由于恒定功率源不具有动态特性,不会影响交流系统的惯性分布,仅改变交流系统的稳态潮流,因此上述问题的本质便转化为了潮流的改变对交流系统小干扰功角稳定性的影响。然而对于这一问题的研究,目前学者鲜有关注,主要是因为与接入发电机不同,该问题的提出和解决是建立在交直流系统间动态交互很弱的基础之上,这也是本文的主要贡献之一。对于一个处于稳态运行的交流系统,当在某一地点接入一恒定功率源后,其新的稳态运行点必然会发生变化,由于总负荷不变,平衡机的输出功率必然减少,若不考虑潮流的改变带来的损耗变化,其减少的功率应基本与注入功率一致。基于上述分析,本文提出了第1个猜测:1)直流电网的输入功率会改变交流系统中发电机的出力,故输入功率变化等效于发电机出力改变对交流系统小干扰功角稳定性的影响。此外,当直流电网的注入功率一定时,接入不同的地点会不同程度地改变原有交流系统的潮流分布,显然,如果其接入地点在平衡机附近,则注入功率会在较小的区域内被平衡机抵消,对潮流的影响范围较小,反之,则会引起较大的潮流变化,对交流系统产生较大的影响。故本文基于此提出第2个猜测:2)直流电网的接入地点会改变交流系统中的潮流分布,接入地点在平衡机附近时对潮流分布造成的影响较小,故其对交流系统小干扰功角稳定性造成的影响也可能是较小的。

最后,以新英格兰系统为例,演示和验证了直流电网的注入功率和接入地点对交流系统小干扰功角稳定性的影响。得出直流电网的输入功率会改变交流系统中平衡机的出力,并对平衡机参与性较高的机电振荡模式产生影响;直流电网的接入地点会改变交流系统中的潮流分布,接入地点在平衡机附近时对交流系统小干扰功角稳定性造成的影响较小。实际分析中可借此避免多端柔性直流电网接入对交流电力系统小干扰功角稳定性的不利影响。

1 交直流混联系统的线性化互联模型

1.1 线性化互联模型

图1显示了一个 $M+L$ 端直流电网接入交流系统的系统结构。其中直流电网的功率来源可以是 L 个风电场,也可以是外部的交流系统($L=0$),与直流电网相连的交流系统共有 n 台同步发电机。不失一般性,本文将用上述系统来分析直流电网接入对交流系统小干扰功角稳定性的影响,并建模如下。

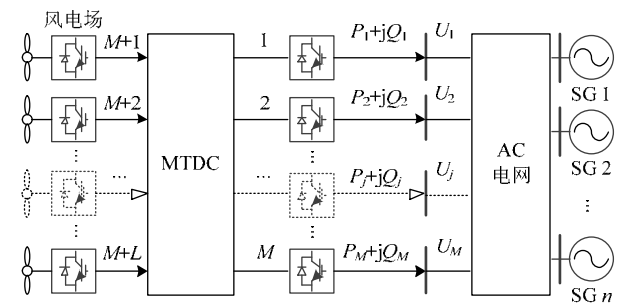


图1 多端柔性直流接入的交直流混联系统

Fig. 1 An AC system with a MTDC grid

假定 $P_j + jQ_j, j=1,2,\dots,M$ 是第 j 个VSC输出的功率, $U_j, j=1,2,\dots,M$ 是第 j 个VSC与交流系统连接点处的电压幅值,则可得出如式(1)所示的一般模型。

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \Delta X_{AC} = A_{AC} \Delta X_{AC} + B_{AC} \Delta S \\ \Delta U = C_{AC} \Delta X_{AC} + D_{AC} \Delta S \end{cases} \quad (1)$$

其中 Δ 表示状态变量的变化量, ΔX_{AC} 是交流系统状态变量形成的矢量矩阵,并有:

$$\Delta U = [U_1 \ U_2 \ \dots \ U_M]^T, \Delta S = [\Delta P \ \Delta Q]$$

$$\Delta P = [P_1 \ P_2 \ \dots \ P_M]^T, \Delta Q = [Q_1 \ Q_2 \ \dots \ Q_M]^T$$

VSC-MTDC系统的状态空间模型如式(2)所示:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \Delta X_{DC} = A_{DC} \Delta X_{DC} + B_{DC} \Delta U \\ \Delta S = C_{DC} \Delta X_{DC} + D_{DC} \Delta U \end{cases} \quad (2)$$

其中 ΔX_{DC} 是直流状态变量形成的矢量矩阵^[10]。

联立式(1)(2)可得图1中交直流混联系统的线性化互联模型为

$$\frac{d}{dt}\Delta X = A\Delta X \quad (3)$$

其中 $\Delta X = [\Delta X_{AC}^T \Delta X_{DC}^T]^T$; $A =$

$$\begin{bmatrix} A_{AC} + B_{AC}(I - D_{DC}D_{AC})^{-1}D_{DC}C_{AC} & B_{AC}(I - D_{DC}D_{AC})^{-1}C_{DC} \\ B_{DC}(I - D_{AC}D_{DC})^{-1}C_{AC} & A_{DC} + B_{DC}(I - D_{AC}D_{DC})^{-1}D_{AC}C_{DC} \end{bmatrix}.$$

1.2 VSC-MTDC 接入对交流系统的影响分析

VSC-MTDC 的接入改变了原交流系统的潮流分布,引起了交直流之间的动态交互,并综合影响了交流系统的小干扰功角稳定性。其中交直流系统之间的动态交互作用在物理形式上表现为交直流传输线路上的功率波动 $\Delta P_j + j\Delta Q_j$, $j=1,2,\dots,M$ 。如果假设 $\Delta P_j + j\Delta Q_j = 0$, $j=1,2,\dots,M$, 即不考虑交直流之间的动态交互,此时直流电网可以等效为恒定功率源 $\Delta P_{j0} + j\Delta Q_{j0}$, $j=1,2,\dots,M$, 其对交流系统的影响主要是通过改变交流系统的潮流分布来实现的。由式(1)可知,当 $\Delta P_j + j\Delta Q_j = 0$, $j=1,2,\dots,M$ 时,交直流互联系统可以认为是 2 个独立的开环子系统,交流系统的状态空间模型可写为

$$\frac{d}{dt}\Delta X_{AC} = A_{AC}\Delta X_{AC} \quad (4)$$

因此,将直流电网等效为恒功率源 $\Delta P_{j0} + j\Delta Q_{j0}$, $j=1,2,\dots,M$, 可以通过计算状态矩阵 A_{AC} 的特征值来确定潮流改变对交流系统功角稳定性造成的影响。

假设当 $\Delta P_j + j\Delta Q_j = 0$, $j=1,2,\dots,M$ 时,状态矩阵 A_{AC} 中的一个特征值记为 λ_{ACi} , 当 $\Delta P_j + j\Delta Q_j \neq 0$, $j=1,2,\dots,M$ 时,状态矩阵 A 中与 λ_{ACi} 对应的特征值变为 $\hat{\lambda}_{ACi}$, 则 $\Delta\lambda_{ACi} = \hat{\lambda}_{ACi} - \lambda_{ACi}$ 表示交直流系统间的动态交互作用对交流系统小干扰功角稳定性造成的影响。

综上,直流电网接入对交流系统小干扰功角稳定性的影响可以分为“潮流”和“动态交互”2 部分来分别计算,并说明如下:

1) 将直流电网等效为恒定功率源,通过计算 A_{AC} 的特征值, λ_{ACi} , 可以确定潮流改变对交流系统的影响。

2) 利用阻尼转矩方法,计算动态交互作用对交流系统的影响, $\Delta\lambda_{ACi}$, 该方法将在下一小节进行介绍。

3) 综合式(1)和式(2),直流电网接入后交流系统的振荡模式可表述为 $\Delta\lambda_{ACi} + \lambda_{ACi}$ 。

1.3 基于阻尼转矩法的动态交互作用分析

重写式(1)如式(5)所示,其中 $\Delta\delta$ 和 $\Delta\omega$ 分别是发电机功角和转速的变化量, Δz 表示交流系统中

其他状态变量形成的矢量矩阵。由式(2)可得 VSC-MTDC 的传递函数模型为式(6)。

通过式(5)和式(6),直流电网向交流系统提供的转矩可写为式(7)。

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 I & 0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta z \end{bmatrix} + \sum_{k=1}^M \begin{bmatrix} 0 \\ b_{P2k} \\ b_{P3k} \end{bmatrix} \Delta P_k + \sum_{k=1}^M \begin{bmatrix} 0 \\ b_{Q2k} \\ b_{Q3k} \end{bmatrix} \Delta Q_k \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = H(s)\Delta U = \begin{bmatrix} H_P(s) \\ H_Q(s) \end{bmatrix} \Delta U \quad (6)$$

其中 $H(s) = C_{DC}(sI - A_{DC})^{-1}B_{DC} + D_{DC}\Delta U$ 。

$$\Delta T_{DC} = \sum_{k=1}^M g_{pk}(s)\Delta P_k + g_{qk}(s)\Delta Q_k = \sum_{k=1}^M g_{pk}(s) \sum_{j=1}^M h_{pkj}(s)\Delta U_j + g_{qk}(s) \sum_{j=1}^M h_{qkj}(s)\Delta U_j \quad (7)$$

其中:

$$g_{pk}(s) = b_{P2k} + A_{23}(sI - A_{33})^{-1}b_{P3k}$$

$$g_{qk}(s) = b_{Q2k} + A_{23}(sI - A_{33})^{-1}b_{Q3k}$$

式中 $h_{pkj}(s)$ 和 $h_{qkj}(s)$, $k, j=1,2,\dots,M$ 分别是 $H_P(s)$ 和 $H_Q(s)$ 中的元素。

在交流系统中,一般有式(8)成立^[17-18]。

$$\Delta U_j = \gamma_{jm}(\lambda_{ACi})\Delta\omega \quad (8)$$

由式(7)(8)可得直流电网对交流系统中第 m 个发电机的机电振荡模态提供的阻尼转矩为

$$\Delta T_{dm} = \text{Re}[\sum_{k=1}^M g_{pkm}(\lambda_{ACi}) \sum_{j=1}^M h_{pkj}(\lambda_{ACi})\gamma_{jm}(\lambda_{ACi}) + \sum_{k=1}^M g_{qkm}(\lambda_{ACi}) \sum_{j=1}^M h_{qkj}(\lambda_{ACi})\gamma_{jm}(\lambda_{ACi})]\Delta\omega_m = d_m\Delta\omega_m \quad (9)$$

式中: $g_{pkm}(s)$ 和 $g_{qkm}(s)$ 分别是 $g_{pk}(s)$ 和 $g_{qk}(s)$ 中的元素; $\text{Re}[\cdot]$ 表示对复数取实部。

假定 $S_{im} = \frac{\partial\lambda_{ACi}}{\partial d_m}$ 为振荡模式对第 m 个发电机

阻尼转矩系数的灵敏度,则交直流系统之间的动态交互作用对交流系统振荡模式的影响可写为

$$\Delta\lambda_{ACi} = \hat{\lambda}_{ACi} - \lambda_{ACi} = \sum_{m=1}^N S_{im}d_m \quad (10)$$

式中 N 表示交流系统发电机的总数。

由上述推导分析可知:通常情况下,交流系统电压幅值 U_j , $j=1,2,\dots,M$ 的动态波动是受限的,所以 $|\gamma_{jm}(\lambda_{ACi})|$ 的数值比较小^[17-18]。由式(9)(10)可知 VSC-MTDC 提供的阻尼转矩也较小,进而得出交流系统受动态交互影响而发生的模式变化 $\Delta\lambda_{ACi}$ 也很小。实际中,由于直流电网控制响应非常快,所

以小干扰下交直流混联系统间的动态交互作用 $\Delta P_j + j\Delta Q_j, j=1,2,\dots,M$ 是比较弱的,功率的波动主要取决于发电机的转子运动,即 $\hat{\lambda}_{ACi} \approx \lambda_{ACi}$ 。显然,与接入发电机不同,直流电网的接入不会对交流系统原有的惯性分布造成明显影响,仅改变了交流系统的潮流,其本质是改变潮流对交流系统小干扰功角稳定性的影响,主要体现在以下2个方面:

1) 对发电机出力的影响。由于系统的负荷恒定,直流电网接入将改变发电机的出力,故其输入功率变化等效于发电机出力改变对交流系统小干扰功角稳定性的影响,这将导致与发电机相关性较高的振荡模式发生相应的变化,如果其向复平面右侧移动,则可能引发系统的稳定性问题,与猜测1相对应。

2) 对潮流分布的影响。直流电网注入功率确定后,直流电网的接入地点会对交流系统的潮流分布产生不同的影响。如果其接入地点在平衡机附近,则注入功率会在较小的区域内被平衡机抵消,交流系统的潮流改变较小,此时接入直流电网对交流系统造成的影响主要为1)中的情况。反之则影响增大,与猜测2相对应。

下面通过案例分析对上述2个猜测进行验证。

2 案例验证

2.1 系统说明

图2中显示了用于研究交直流混联系统小干扰功角稳定性的结构^[19-20]。直流电网采用主从控制,换流站1控制直流电压,网络为5端环状结构,其中有2端与交流系统相连,其余3端与风电场^[21]相连,负荷和线路模型均采用文献[19]中的数据。本节共有9个机电振荡模式被用来研究直流电网的接入对交流系统造成的影响,考虑到交直流混联系统之间的动态交互较弱,主要研究多端直流接入对

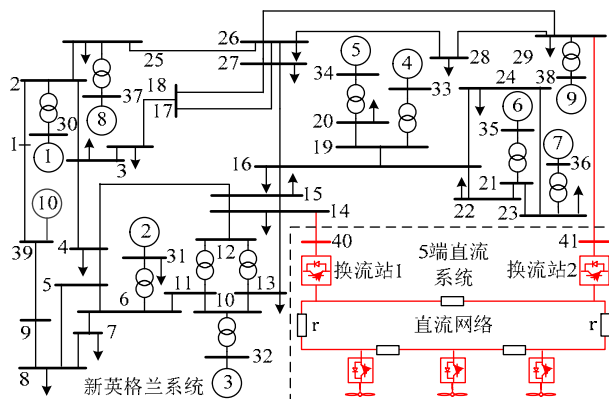


图2 含VSC-MTDC的新英格兰系统结构

Fig. 2 Configuration of NETS with MTDC

交流系统平衡机出力和潮流分布的影响。

2.2 注入功率变化对交流系统机电振荡模式的影响

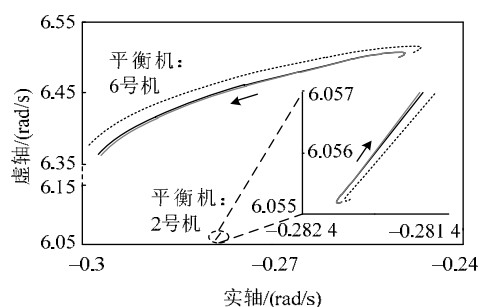
直流电网接入交流系统后,交流系统中平衡机的输出功率会发生相应的改变以维持整个系统的功率平衡,此时交流系统中对平衡机较为敏感的振荡模式将会发生变化,体现为交流系统的小干扰功角稳定性受到了直流电网接入的影响。本节将重点研究直流输入功率的变化对交流系统小干扰功角稳定性的影响。

图2中,换流站1的接入节点选定为节点4,换流站2为节点29,风电功率从2 pu增加为6 pu,定功率站输入恒定功率1 pu。图3中分别显示了交流系统中2个振荡模式的变化曲线,黑色虚线表示将直流换流站等效为恒定功率源后交流系统振荡模式的变化过程;灰色曲线表示考虑直流换流站的动态控制后交流系统振荡模式的变化过程;黑色实线表示通过阻尼转矩分析法计算出的振荡模式变化过程。对图3中的模式分别进行参与性分析,可得发电机2和6在上述2个模式中各自的参与因子,如图4所示。

通过图3、4的分析,可得:

1) 利用阻尼转矩法分析交直流系统间的动态交互作用是正确可行的,且交互作用一般很弱,可以将直流电网等效为恒定功率源进行简单的快速分析,这与前面的分析一致。

2) 直流电网输入功率的变化由交流系统中平



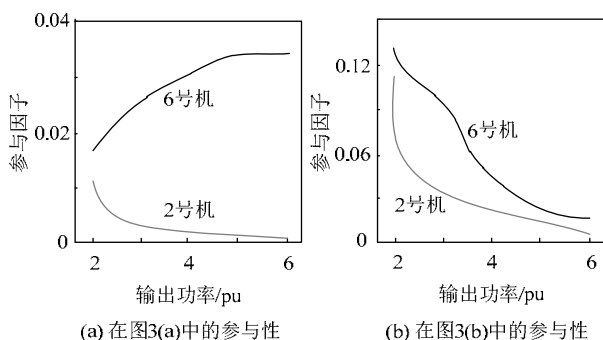


图4 平衡机在振荡模式中的参与性

Fig. 4 Participation of slack machine in oscillation modes

平衡机的出力改变平衡,故输入功率变化等效于平衡机出力改变对交流系统小干扰功角稳定性的影响。当平衡机出力发生变化时,与其相关性较高的振荡模式也会发生相应的变化,平衡机不同,则产生变化的模式也不相同,如果直流功率的注入使得交流系统的机电振荡模式向右移动太多,则可能会引发交流系统的稳定性问题。图 3(a)和图 4(a)中,2 号机对该模式的参与性较低,因此当 2 号机作为平衡机时,其出力的变化不会对该模式产生明显的影响。相反,6 号机在该模式中的参与性较强,相比于 2 号机,6 号机出力的改变会对该模式产生明显的影响。图 3(b)和图 4(b)中展示的结果和上述分析一致,由于 2 号机在图 3(b)模式中的参与性始终低于 6 号机,因此 2 号机出力的变化对振荡模式的影响也总是小于 6 号机。

2.3 直流电网接入点对交流系统机电振荡模式的影响

2.3.1 接入 1 个换流站

对于如图 2 所示的系统,为避免其他换流站输入功率的影响,先考虑一个换流站(换流站 1)接入的情况,换流站 2 的输送功率定为 0 pu,交流系统的平衡机为 2 号机,换流站 1 的稳态注入功率为 2 pu。

当直流换流站 1 分别接到节点 1—29 处,交流系统的机电振荡模式将会发生对应的变化 $\delta\lambda_i^p$ 。 $i=1\sim 9$ 表示交流系统第 i 个机电振荡模式, $p=1\sim 29$ 表示直流换流站 1 接入的节点编号。 $\delta\lambda_i^p$ 表示直流换流站 1 接入节点 p 处时,对交流系统第 i 个机电振荡模式的影响。 $\delta\lambda_{all}^p = \sum_{i=1}^9 |\delta\lambda_i^p|$ 表示直流换流站 1 接入节点 p 处时,对交流系统全部机电振荡模式造成的影响之和,该数值越大,表示直流的接入对交流系统机电振荡模式的影响越大。图 5 显示了直流换流站 1 分别接到节点 1—29 处时, $\delta\lambda_{all}^p$ $p=1\sim 29$ 的大小。

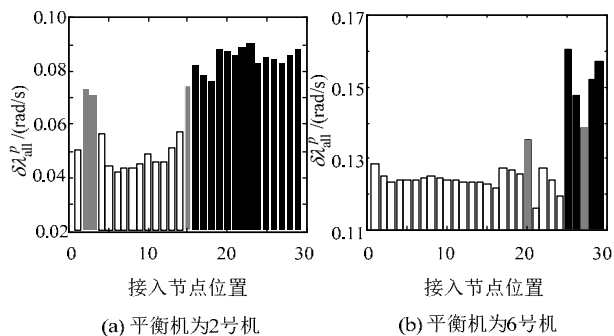


图5 直流接入不同节点对交流系统的影响结果

Fig. 5 Calculation results of AC/DC systems with different common connection point

由图 5(a)可知,当直流换流站接在节点 6 时,对交流系统机电振荡模式的影响最小,相反地,接入离节点 6 较远的区域(图中黑色节点表示的区域),其对交流系统的影响将比较明显。这说明了当直流接入平衡机附近时,其输入功率通过平衡机进行了调节,对交流系统潮流分布的改变较小,相反地,接入区域距离平衡机较远,其对交流系统潮流分布的影响也较大,对机电振荡模式的影响也越明显。

如果将图 5(a)的影响结果分为 3 个等级,令 $\delta\lambda_{all}^p \in [0.0287, 0.0493]$ 的影响强度为较弱的, $\delta\lambda_{all}^p \in [0.0493, 0.0699]$ 的影响强度为中等的, $\delta\lambda_{all}^p > 0.0699$ 的影响强度为较强的。则可对图 2 中的交流系统进行区域划分,用于表示直流网接入对交流系统机电振荡模式的影响强弱程度分布,如图 6 所示。

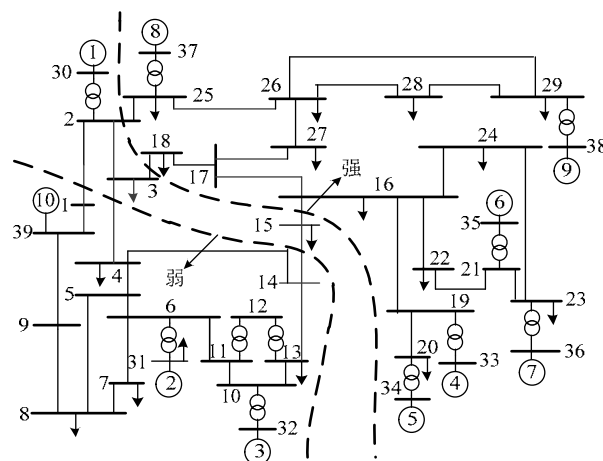


图6 直流接入对交流系统机电振荡模式的影响等级划分
Fig. 6 Influence level of AC system with different AC/DC connection point

由图 6 可知,在平衡机附近的区域接入直流电网,对原交流系统机电振荡模式的影响是较弱的。相反地,距离平衡机较远的区域,直流电网的接入将会对交流系统产生较为明显的影响。综合图 5(a)

和图6可知,直流接入对交流系统的影响呈现区域性分布,如图中绿色部分和红色部分所示,并且这种影响是渐变的,之间总能够找到如灰色部分所示的过渡节点或区域。

显然,若交流系统的平衡机发生了改变,则图6中的区域分布也会发生相应的变化,为进一步验证这一猜测,现假设图2系统的平衡机由2号机变为了6号机,重复上述研究过程,可得图5(b)和图7。

由图5(b)可知,当直流换流站接在节点21时,对交流系统机电振荡模式的影响最小,类似地,接在平衡机附近的区域(图中白色节点表示的区域),其对交流系统的影响均比较小;相反地,接入离节点21较远的区域(图中黑色节点表示的区域),其对交流系统的影响将比较明显。同样将图5(b)影响结果分为3个等级,令 $\delta\lambda_{all}^p \in [0.116, 0.130]$ 的影响强度为较弱, $\delta\lambda_{all}^p \in [0.130, 0.145]$ 的影响强度为中等, $\delta\lambda_{all}^p > 0.145$ 的影响强度为较强的。则直流网接入对交流系统机电振荡模式的影响强弱程度见图7。

由图5(b)和图7可知,当交流系统的平衡机发生变化后,直流电网对交流系统的影响也会发生改变,表现为:1)直流电网接入同一节点的影响大小发生改变;2)直流电网接入对交流系统影响程度的分布区域发生了改变。但是相比于2.2中的研究结果,直流电网接入地点对交流系统的影响是较小的。

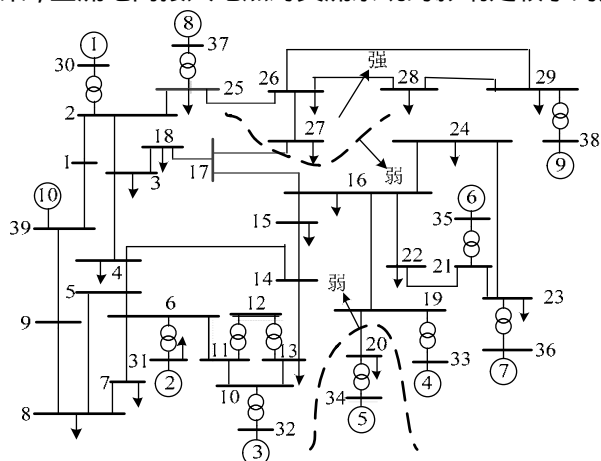


图7 直流接入对交流系统机电振荡模式的影响等级划分
Fig. 7 Influence level of AC system with different AC/DC connection point

2.3.2 接入2个换流站

当换流站1的接入地点和功率确定后,其对交流系统潮流的影响也就随之确定了,换流站2接入的影响可以视为是对换流站1接入后潮流的影响。设定换流站2的输入功率为2 pu,重复图5的研究过程,其结果如图8、9所示。

分析图8、9可得:

1) 换流站2接入后对交流系统的影响与换流

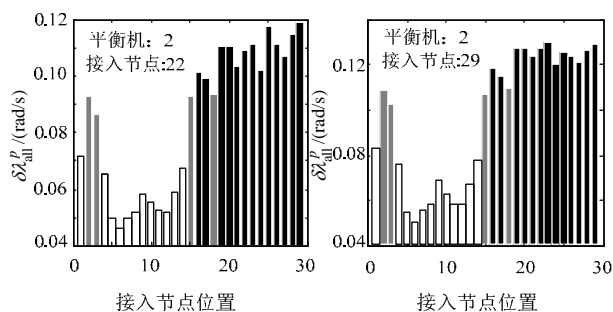


图8 直流接入不同节点对交流系统的影响结果1
Fig. 8 Calculation results No.1 of AC/DC systems with different common connection point

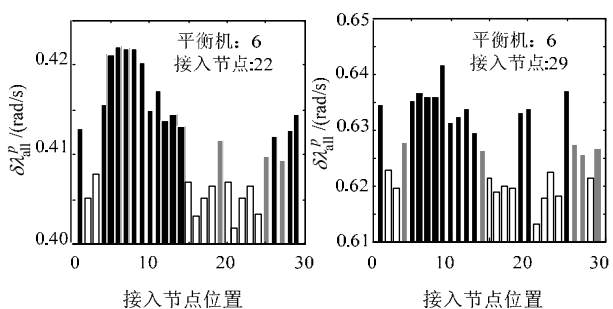


图9 直流接入不同节点对交流系统的影响结果2
Fig. 9 Calculation results No.2 of AC/DC systems with different common connection point

站1的接入地点有关,因为换流站1的接入改变了原始的潮流分布。如果换流站1的接入对交流系统的影响较小(体现为平衡机在交流系统振荡模式中的参与性很小,平衡机出力的变化不会对交流系统造成明显影响,例如平衡机2),则换流站2的接入对交流系统的影响基本与图5(a)中的分布一致。若换流站1的接入对交流系统的影响较大(体现为平衡机在交流系统振荡模式中的参与性较大,平衡机出力的变化会对交流系统造成明显影响,例如平衡机6),则换流站2的接入对交流系统的影响会与图5(b)中的分布产生较大差异。

2) 无论接入的节点位置和注入功率发生怎样的变化,在平衡机处注入功率总能使得交流系统的影响较小,因为此时直流电网的注入功率会在较小区域内被平衡机抵消,对交流系统的潮流改变是较小的。

3) 当直流电网接入交流系统时,平衡机的动态性能将会直接影响到交流系统的小干扰功角稳定性,尤其体现在平衡机参与性较高的振荡模式上。此外直流电网的接入地点也会对交流系统产生一定的影响。当直流电网的接入节点在平衡机附近时,其对交流系统造成的影响是较小的。

3 结论

1) 建立了交直流混联的线性化互联模型,通过对模型的分析,得出直流电网的接入对交流系统

功角稳定性的影响主要体现在 2 个方面,一个是对交流系统潮流的改变,另一个是交直流动态交互对交流系统的影响。

2) 结合阻尼转矩分析法,得出交直流动态交互对交流系统的影响一般很小,直流电网可以等效为恒功率源进行研究,其本质是平衡机出力改变和潮流分布变化对交流系统小干扰功角稳定性影响。

3) 当直流电网接入交流系统时,首先会改变平衡机的出力,故输入功率变化等效于平衡机出力改变对交流系统小干扰功角稳定性的影响,这将直接影响到平衡机参与性较高的振荡模式。其次直流电网的接入地点会导致交流系统的潮流发生不同程度的变化,当其接入地点在平衡机附近时,注入功率会在较小的区域内被平衡机抵消,造成的潮流改变是较小的,此时其对交流系统小干扰功角稳定性的影响也是较小的。

4) 由于交直流系统间的动态交互较弱,因此将直流电网等效为恒定功率源可以较为准确地对交直流混联系统的小干扰功角稳定性进行快速分析。但是对于动态交互作用较强的系统,例如发电机与交流系统,则该方法失效。

本文基于交直流系统间的弱交互作用提出了 2 个新的猜测并进行了仿真演示和验证。通过将直流系统等效为恒定功率源并结合上述 2 个猜测,无需考虑直流系统的动态特性,能够较为简便地预估直流系统接入对交流系统小干扰功角稳定性的影响,避免其带来的不利因素。

参考文献

- [1] 马为民,吴方劫,杨一鸣,等.张涛柔性直流输电技术的现状及应用前景分析[J].高电压技术,2014,40(8):2429-2439.
Ma Weimin, Wu Fangjie, Yang Yiming, et al. Flexible HVDC transmission technology's today and tomorrow[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2429-2439(in Chinese).
- [2] 柴润泽,张保会,薄志谦.含电压源型换流器直流电网的交直流网络潮流交替迭代方法[J].电力系统自动化,2015,39(7):7-13.
Chai Runze, Zhang Baohui, Bo Zhiqian. Alternating iterative power flow algorithm for hybrid AC/DC networks containing DC grid based on voltage source converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 7-13(in Chinese).
- [3] 钱甜甜,苗世洪.基于节点电流关系的多端柔性直流输电系统潮流计算[J].电网技术,2016,40(5):1308-1312.
Qian Tiantian, Miao Shihong. Power flow algorithm of multi-terminal VSC-HVDC system based on nodal current relation[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1308-1312(in Chinese).
- [4] 杨洁,刘开培,余俞,等.交流电网互联的双端柔性直流输电系统小信号建模[J].中国电机工程学报,2015,35(9):2177-2184.
Yang Jie, Liu Kaipei, Yu Yu, et al. Small signal modeling for VSC-HVDC used in AC grid interconnection[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2177-2184(in Chinese).
- [5] 杨洁,刘开培,饶雪,等.多端柔性直流输电系统小信号建模[J].中国电机工程学报,2015,35(16):4015-4024.
Yang Jie, Liu Kaipei, Rao Xue, et al. Small signal modeling for VSC-MTDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4015-4024(in Chinese).
- [6] 唐庚,徐政,刘昇,等.适用于多端柔性直流输电系统的新型直流电压控制策略[J].电力系统自动化,2013,37(15):125-132.
Tang Geng, Xu Zheng, Liu Sheng, et al. A novel DC voltage control strategy for VSC-MTDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 125-132(in Chinese).
- [7] 熊凌飞,韩民晓.基于组合方式的多端柔性直流输电系统控制策略[J].电网技术,2015,39(6):1586-1592.
Xiong Lingfei, Han Minxiao. A novel combined control strategy for VSC-MTDC[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1586-1592(in Chinese).
- [8] 梁少华,田杰,曹冬明,等.柔性直流输电系统控制保护方案[J].电力系统自动化,2013,37(15):59-65.
Liang Shaohua, Tian Jie, Cao Dongming, et al. A control and protection scheme for VSC-HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 59-65(in Chinese).
- [9] 李斌,何佳伟,冯亚东,等.多端柔性直流电网保护关键技术[J].电力系统自动化,2016,40(21):2-12.
Li Bin, He Jiawei, Feng Yadong, et al. Key techniques for protection of multi-terminal flexible DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 2-12(in Chinese).
- [10] 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 Trans on Power Systems, 2012, 27(4): 1818-1830.
- [11] Beerten J, D'Arco S, Suul J A. Identification and small-signal analysis of interaction modes in VSC MTDC systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2016, 31(2): 888-897.
- [12] Harnefors L, Bongiorno M, Lundberg S. Input-admittance calculation and shaping for controlled voltage-source converters[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2007, 54(6): 3323-3334.
- [13] Zhang L, Harnefors L, Nee H P. Modeling and control of VSCHVDC links connected to island systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(2): 783-793.
- [14] Xu L, Fan L. Impedance-based resonance analysis in a VSCHVDC system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2013, 28(4): 2209-2216.
- [15] Chaudhuri N, Majumder R, Chaudhuri B, et al. Stability analysis of VSC MTDC grids connected to multi-machine AC systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(4): 2774-2784.
- [16] Harnefors L, Johansson N, Berggren B. Inter-area oscillation damping using active-power modulation of multi-terminal HVDC transmissions[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2014, 29(5): 2529-2538.
- [17] Du Wenjuan, Bi Jingtian, Cao Jun, et al. A method to examine the impact of grid connection of the DFIGs on power system electromechanical oscillation modes[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2016, 31(5): 3775-3784.
- [18] Wang Haifeng, Du Wenjuan. Analysis and damping control of power system low-frequency oscillations[M]. New York: Springer, 2016.
- [19] Padiyar K R. Power system dynamics stability and control[M]. New York: Wiley, 1996.
- [20] Rogers G. Power system oscillations[M]. Norwell: MA Kluwer, 2000.
- [21] Li Shuhui, Haskew T A. Optimal and direct-current vector control of direct-driven PMSG wind turbines[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2012, 27(5): 2325-2337.



付强

收稿日期:2017-05-22。

作者简介:

付强(1993),男,博士,研究方向为新能源电力系统,E-mail:1197348393@qq.com;

杜文娟(1979),女,通信作者,教授,研究方向为电力系统分析与控制,新能源电力系统,E-mail:1376983331@qq.com。

(责任编辑 马晓华)