

DOI: 10.7667/PSPC170319

# 基于连续潮流法的含双端 VSC-HVDC 交直流系统负荷裕度分析

王振浩, 由作宇, 黄亚磊, 李扬, 李国庆

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132102)

**摘要:** 为了分析含双端 VSC-HVDC 交直流系统的静态电压稳态特性, 结合交替求解法和连续潮流法给出一种交直流连续潮流法。根据初始输入得到初始解确定负荷增长方向, 引入负荷裕度参数。通过调节 VSC-HVDC 的控制策略, 最终得到系统不同情况下的负荷裕度, 采用左特征向量乘法对系统进行负荷裕度灵敏度计算。对含双端 VSC-HVDC 的 IEEE39 节点系统和 IEEE118 节点系统进行建模仿真, 得出了系统负荷裕度以及负荷裕度灵敏度近似线性的变化规律。直流线路功率流向对系统负荷裕度的影响相反, 验证了方法的有效性。

**关键词:** 交直流系统; 连续潮流; 电压稳定性; 负荷裕度; 柔性直流输电

## Load margin analysis of hybrid AC/DC system with two terminal VSC-HVDC using continuous power flow method

WANG Zhenhao, YOU Zuoyu, HUANG Yalei, LI Yang, LI Guoqing

(School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132102, China)

**Abstract:** In order to analyze the static voltage steady state characteristics of a two terminal VSC-HVDC AC/DC system, the AC/DC continuation power flow method is proposed by combining alternating solution method with continuation power flow method. The direction of the load growth is determined by initial solution from the initial input and the load power margin parameter is introduced. The different system load margin is gotten by adjusting VSC-HVDC control strategy, and the left eigenvector multiplier method is used in the system load margin sensitivity calculation. Based on IEEE39 bus system and the IEEE 118 bus system with two terminal VSC-HVDC modeling and simulation, it is concluded that the changing rules of system load margin and load margin sensitivity are approximate linear. The impact of DC power flow on the system load power margin is contrary. The results verify that the proposed method is valid.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902401).

**Key words:** AC/DC system; continuation power flow; voltage stability; load margin; VSC-HVDC

## 0 引言

近年来, 柔性直流输电技术在大规模可再生能源并网和智能电网建设中发挥着重要的作用, 对交直流输电系统进行静态电压稳定分析就显得格外重要。从负荷裕度角度对电力系统电压稳定性进行分析的主要方法有: 连续潮流法、崩溃点法和静态非线性规划法。初值不合理时崩溃点法所得计算值与实际值差别很大。初值的选取和系统规模限制了非线性规划方法解的求取。连续潮流算法可以通过引

入连续参数的方法克服潮流方程在极限点(鞍结分岔点)附近的病态, 得到静态电压稳定裕度<sup>[1]</sup>。文献[2]中给出了交直流互联系统各节点 P-V 曲线的求取方法。该算法采用基于统一迭代法的连续潮流法, 在临界点附近采取缩小步长的策略, 可以精确求出整个 P-V 曲线并得到精确临界点。文献[3]提出了一种基于电压崩溃指数的极限传输容量计算模型和实用化算法, 利用雅可比矩阵信息自动选取合适的状态推演步长, 不需要每步状态推演都有完整的牛顿迭代过程, 从而使计算速度大幅提升。近年来基于连续潮流法的电力系统静态电压稳定性分析中, 在算法的快速性和准确性方面都有了很大的发展<sup>[4]</sup>。

上述文献对交直流系统电压稳定性的研究局限于常规直流, 目前对含有 VSC-HVDC(Voltage Sourced Converter Based High Voltage Direct Current Transmission)交直流系统电压稳定性分析的文章较少, 随着近年来柔性直流输电技术的蓬勃发展与应用, 对含有 VSC-HVDC 的交直流系统的电压稳定性分析就显得分外重要。本文在连续潮流算法(Continuation Power Flow, CPF)的基础上提出了一种交直流连续潮流法从负荷裕度的角度对交直流系统进行电压稳定性分析。因算法基于当前工作点出发, 随负荷增长依次求解潮流, 直到求得临界点得到完整曲线, 与崩溃点法和非线性规划法相比没有了初值选择的问题, 又因采用了参数化技术, 在有效避免了潮流雅可比矩阵奇异的同时又具有很强的模型适应性, 求解不受限于系统规模, 可稳定快速地得出结果。

## 1 VSC-HVDC 稳态模型

VSC-HVDC 模型如图 1 所示。设 VSC 输出的基波电压相量为  $\dot{U}_c = U_c \angle \theta_c$ ,  $\dot{U}_s = U_s \angle \theta_s$  为与交流系统连接节点处的电压相量,  $P_s$  和  $Q_s$  分别为交流系统流入换流变压器的有功功率和无功功率,  $P_c$  和  $Q_c$  分别为流入换流器的有功功率和无功功率,  $X_L$  为换流变压器阻抗,  $R_L$  为换流变压器损耗与换流器损耗等效电阻, 流过换流变压器的电流为  $\dot{I}_c$ ,  $U_d$  和  $I_d$  分别为直流侧的电压和电流<sup>[5]</sup>。

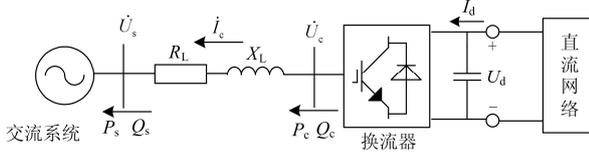


图 1 VSC-HVDC 模型

Fig. 1 Model of VSC-HVDC

电压  $\dot{U}_s$ 、 $\dot{U}_c$ 、电流  $\dot{I}_c$  和复功率  $\dot{S}_s$  满足:

$$\dot{I}_c = \frac{\dot{U}_s - \dot{U}_c}{R_L + jX_L} \quad (1)$$

$$\dot{S}_s = P_s + jQ_s = \dot{U}_s \dot{I}_c^* \quad (2)$$

将式(1)代入式(2), 对相关变量进行整合化简, 令  $\delta = \theta_s - \theta_c$ ,  $Y_1 = 1/\sqrt{R_L^2 + X_L^2}$ ,  $\alpha = \arctan(X_L/R_L)$ , 则可得:

$$\begin{cases} P_s = -Y_1 U_s U_c \cos(\delta + \alpha) + Y_1 U_s^2 \cos \alpha \\ Q_s = -Y_1 U_s U_c \sin(\delta + \alpha) + Y_1 U_s^2 \sin \alpha \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} P_c = -Y_1 U_s U_c \cos(\delta - \alpha) - Y_1 U_c^2 \cos \alpha \\ Q_c = -Y_1 U_s U_c \sin(\delta - \alpha) - Y_1 U_c^2 \sin \alpha \end{cases} \quad (4)$$

VSC 换流器损耗已由电阻  $R$  等效, 故有:

$$P_d = P_c = U_d I_d = Y_1 U_s U_c \cos(\delta - \alpha) - Y_1 U_c^2 \cos \alpha \quad (5)$$

另外,  $U_c$  和  $U_d$  之间有以下关系成立:

$$U_c = \frac{\sqrt{6}}{4} M U_d \quad (6)$$

由此, 式(1)—式(6)构成了 VSC-HVDC 的稳态模型。式中  $M$  为 VSC 的调制度, 其取值范围为  $[0, 1]$ 。

## 2 交直流系统连续潮流算法

交直流混合系统连续潮流算法是在考虑电压源换流器特性的基础上将连续潮流法与交直流潮流算法相结合。常规潮流方法在稳定临界点附近时, 雅可比矩阵会出现奇异, 无法得到系统运行的临界点的位置<sup>[6]</sup>。连续潮流法通过增加一个负荷参数  $\lambda$ , 改变方程组的收敛方向, 解决了常规潮流方程在临界点附近发散的问题<sup>[7-8]</sup>。扩展后的潮流方程避免了雅可比矩阵出现奇异的情况, 可以应用于跟踪和计算整个系统的负荷以及发电机功率的变化, 并分析系统的稳定性<sup>[9-10]</sup>。本文采用的是交替求解法进行交直流潮流计算, 由于交流系统与直流系统的潮流计算是解耦的, 所以混合系统的潮流计算可采用交直流交替求解算法实现, 交替计算交直流混联系统中的交流部分和直流部分的状态变量, 并将结果相互迭代, 直至状态变量全都收敛为止<sup>[11-12]</sup>。

对于  $m$  节点的交流网络母线  $i$  的潮流方程为

$$P_i(U, \delta) = U_i \sum_{j=1}^m U_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \quad (7)$$

$$Q_i(U, \delta) = U_i \sum_{j=1}^m U_j [G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (8)$$

所有交流母线的非线性潮流方程可以使用基于下列潮流方程的标准牛顿-拉夫逊法解决, 在连续算法中交流网络的计算包含了换流站。为了包括 VSC 站, 在上式中功率不匹配的  $\Delta P^{(k)}$  和  $\Delta Q^{(k)}$  得到扩展并包括了连接到交流网络的换流站的输入功率<sup>[13]</sup>。如果换流器是处在定无功功率的控制方式下, 则无功输出被作为负向负载加到不平衡功率中:

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{\text{gen}} - (Q_i^{\text{dem}} - Q_{s,i}) - Q(U^{(k)}, \delta^{(k)}) \quad (9)$$

如果换流器采用定电压控制, 则换流站可以同对电压控制的交流发电机近似地对待, 此交流发电

机的无功注入是未知的, 将交流母线的 PQ 节点转变成无穷大电源的 PV 节点以此来计算无功功率的输入<sup>[14]</sup>。

对于每一个换流站来说, 除了直流平衡节点的换流器, 交流网络的有功功率输入  $P_s$  是已知的, 不平衡有功功率被扩展为

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{\text{gen}} - (P_i^{\text{dem}} - P_{s,i}) - P(U^{(k)}, \delta^{(k)}) \quad (10)$$

换流站单相电抗器作为初始值的估算以及直流网络假设为无损的。第  $n$  个作为平衡节点的换流站的运行方程为

$$P_{s,n}^{(0)} = -\sum_{j=1}^{n-1} P_{s,j} \quad (11)$$

对于直流平衡节点, 一旦由交流潮流结果求得交流网络电压  $\underline{U}_s$  以及功率输入  $P_s$  和  $Q_s$ , 位于换流器侧的电压  $\underline{U}_c$  可以通过对换流器电流  $\underline{I}_c$  的初次计算得到

$$\underline{I}_{c,i} = \frac{P_{s,i} - jQ_{s,i}}{\underline{U}_{s,i}^*}, \forall i < n. \quad (12)$$

使用这个表示  $\underline{I}_{c,i}$  去计算复杂的电压降落忽略换流器阻抗  $Z_{c,i}$ , 换流器侧的电压可以被表示为

$$\underline{U}_{c,i} = \underline{U}_{s,i} - Z_{c,i} \cdot \frac{P_{s,i} - jQ_{s,i}}{\underline{U}_{s,i}^*}, \forall i < n. \quad (13)$$

在换流器侧的换流器功率  $P_c$  和  $Q_c$  是在交流网络潮流计算之后计算的。在计算过换流器功率损耗  $P_{\text{loss}}$  之后, 直流网络的输入是已知的。直流网络电压和直流平衡母线功率是由迭代过程得到的。

在计算过程中考虑 VSC 换流站的控制策略, 需要针对不同的控制方式确定不同的接口方程, 采取定有功功率控制的换流站

$$P_s = P_{\text{ref}} \quad (14)$$

采取定无功功率控制的换流站

$$Q_s = Q_{\text{ref}} \quad (15)$$

式中:  $P_s$ 、 $Q_s$  为注入交流系统的有功功率、无功功率量;  $P_{\text{ref}}$ 、 $Q_{\text{ref}}$  为其有功功率、无功功率设定值; 对于定直流电压控制的换流站,  $P_s$  可由式(16)计算。

$$P_s = U_{\text{dref}} I_d + P_{\text{loss}} + I_c^2 R_L \quad (16)$$

$$P_{\text{loss}} = f(I_c) = aI_c^2 + bI_c + c \quad (17)$$

式中:  $U_{\text{dref}}$  为直流电压设定值;  $P_{\text{loss}}$  指换流器损耗;  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为损耗系数, 且  $c$  为固定损耗。

采取定交流电压控制的换流站无功功率输出量  $Q_s$  就无功输出而言公式为

$$Q_s = -\frac{U_{\text{sref}}(U_{\text{sref}} - U_c \cos(\theta_s - \theta_c))}{X_L} \quad (18)$$

式中,  $U_{\text{sref}}$  表示换流站定交流电压设定值。

在确定所需迭代步骤后, 在交直流潮流计算中引入负荷参数  $\lambda_z$ , 其表示着当前的负荷水平, 故交直流系统潮流统一方程变为

$$F(U, \theta, \lambda_z, X) = 0 \quad (19)$$

式中:  $U$  为交流系统节点电压向量;  $\theta$  为电压相角;  $X$  为换流站的待求变量。

在预测步骤结束后,  $\lambda_z$  根据所得的负荷参数  $\lambda$  对进行更新, 采用交替求解法对交直流系统潮流进行计算, 直流部分的潮流计算采用牛顿法或高斯-塞德尔法, 计算交流系统潮流时采用 P-Q 分解法。循环迭代, 最终得到当前运行状态下的系统的 P-V 曲线以及电压崩溃点。通过控制 VSC-HVDC 的控制参数, 可以得到不同的情况下的 P-V 曲线。在本文中, 利用交直流连续潮流算法对含双端 VSC-HVDC 的交直流系统进行负荷裕度分析, 并绘制 P-V 曲线来分析系统负荷裕度的变化(即鞍结分枝点的  $\lambda$  值的变化), 其具体过程如图 2 所示。

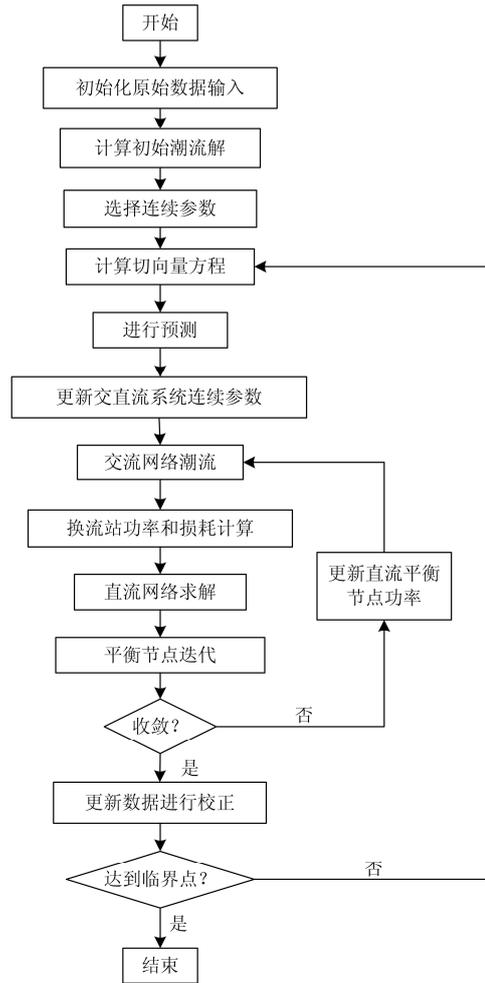


图 2 交直流连续潮流法计算流程框图

Fig. 2 Flow chart of AC/DC continuation power flow algorithm

### 3 负荷裕度灵敏度法

#### 3.1 基本思路

电压稳定裕度指标是指当前运行点与电压崩溃点之间的距离。本文中对于含双端 VSC-HVDC 的交直流系统电压稳定性研究, 首先进行负荷功率极限点的计算, 采用所得交直流连续潮流法求得负荷功率极限点, 之后用左特征向量乘子法计算负荷裕度对 VSC 换流站任意控制参数的灵敏度。

#### 3.2 数学模型的建立

基本潮流公式可表示为

$$f(x, \lambda, p) = 0 \quad (20)$$

式中:  $X$  为状态变量;  $\lambda$  矢量表示负荷水平;  $P$  为 VSC-HVDC 系统任意参数。

令  $\lambda_0$  为某运行点的负荷水平,  $\hat{k}$  ( $\hat{k}$  单位相量) 为负荷增长方向, 则鞍点处的负荷为

$$\lambda = \lambda_0 + \hat{k}L \quad (21)$$

式中,  $L$  为负荷裕度,  $L \in R$ 。由于  $\hat{k}$  为单位相量, 则

$$L = \|\lambda - \lambda_0\|_{\infty} \quad (22)$$

鞍节分歧点处对应于  $f_x$  的零特征值必有一左特征矢量  $\omega(x, \lambda, p)$  使得:

$$\omega(x, \lambda, p) f_x(x, \lambda, p) = 0 \quad (23)$$

在鞍点  $(x_*, \lambda_*, p_*)$  处对方程(20)线性化得:

$$f_x \Big|_{(x_*, \lambda_*, p_*)} \Delta x + f_{\lambda} \Big|_{(x_*, \lambda_*, p_*)} \Delta \lambda + f_p \Big|_{(x_*, \lambda_*, p_*)} \Delta p = 0 \quad (24)$$

这里,  $f_{\lambda}$  和  $f_p$  分别是  $f$  对  $\lambda$  和  $P$  的导数, 在鞍点处左特征向量  $\omega = \omega(x_*, \lambda_*, p_*)$ , 线性化式(21)得  $\Delta \lambda = \hat{k} \Delta L$ , 代入式(24)化简得

$$\omega f_{\lambda} \Big|_{*} \Delta L + \omega f_p \Big|_{*} \Delta p = 0 \quad (25)$$

式中:  $\omega$  为在鞍点处雅克比矩阵零特征值的左特征向量;  $f_{\lambda} \Big|_{*}$  和  $f_p \Big|_{*}$  分别为潮流方程在鞍点处对负荷参数  $\lambda$  和控制参数  $P$  的偏导数值;  $\Delta L$  和  $\Delta p$  分别为负荷裕度和任意参数的变化量。

由式(25)可得负荷裕度  $L$  相对于参数  $P$  的灵敏度关系为

$$L_p \Big|_{*} = \frac{\Delta L}{\Delta p} \quad (26)$$

### 4 算例分析

本文采用上述提出的交直流连续潮流法对加入双端 VSC-HVDC 的 IEEE39 节点系统和 IEEE118 节点系统进行负荷裕度分析, 以原系统的负荷裕度为参考值, 通过改变 VSC-HVDC 的控制参数, 使传输功率变化, 得到负荷裕度的变化, 并绘制其变

化的 P-V 曲线, 通过 P-V 曲线鞍节分歧点的变化分析其电压稳定性。

#### 4.1 IEEE39 节点系统分析

为验证本文算法的有效性, 以 IEEE39 节点系统为例, 利用 Matlab 编程和仿真计算。文献[15]所提线路关键性指标能更全面地识别出系统中的关键线路, IEEE39 节点系统中线路(16-17)带权重介数指标大, 位于重要的输电路径上, 故对其进行改造, 在其 16、17 节点之间增加一个电压等级为  $\pm 200$  kV 的双端柔性直流线路替换原交流线路, 得到的交直流系统如图 3 所示。

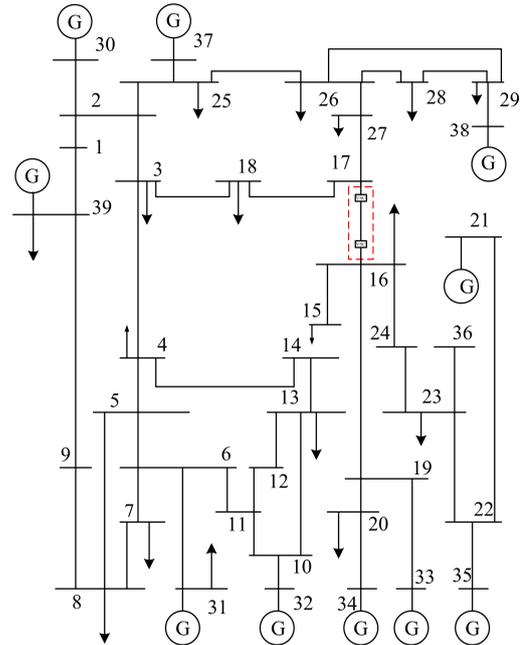


图 3 IEEE39 节点系统

Fig. 3 IEEE39-bus system

交直流网络基准容量统一为 100 MVA, 换流站均为 MMC 结构, DC 电网基准电压为 200 kV。换流站 1 采用定有功功率定交流电压控制, 换流站 2 采用定直流电压定无功功率控制, 换流站模型参数如表 1 所示。

表 1 VSC 模型参数

Table 1 Parameters of VSC model

$N_B$	$R/p.u.$	$X_l/p.u.$	$P_1/p.u.$	$Q_1/p.u.$	$U/p.u.$	$\theta/(^\circ)$
16	0.006	0.160	0.135	0.055	1.000	0.000
17	0.006	0.160	0.145	0.058	1.000	0.000

表 1 中:  $N_B$  表示与 VSC 换流站相连接的交流母线号;  $P_1$ 、 $Q_1$ 、 $U$  和  $\theta$  分别为 VSC 所在母线的负荷有功功率、无功功率、电压幅值和相角;  $R$ 、 $X_L$ 、 $P_1$ 、 $Q_1$  由系统给定。

应用所提方法对改造后的 IEEE39 节点系统进

行负荷裕度分析(以节点 16 为例)。

(1) 情景 1: 改变柔性直流换流站所在直流线路传输的有功功率, 换流站传输无功功率保持不变。

(2) 情景 2: 改变柔性直流换流站发出或吸收的无功功率, 保持直流线路传输的有功功率不变。

情景 1 的结果如图 4 所示(图中  $P$ 、 $Q$  基准值为 100 MVA、100 Mvar)。红线对应  $P=0$  时的交流系统原始状态, 其余均为加入 VCS-HVDC 后无功功率不变、改变有功功率的状态, 其中蓝线、绿线、黄线和黑线分别对应  $P$  为 -300 MW、-150 MW、150 MW、300 MW 时的曲线。若  $P$  为正值, 表示功率流向为从节点 17 流向节点 16; 反之, 则表示相反流向。

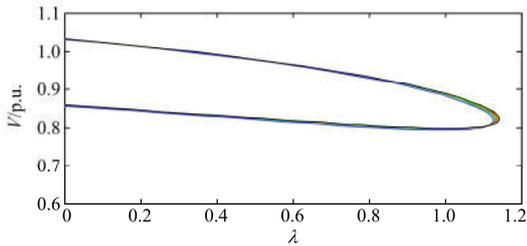


图 4 情景 1 所得 P-V 曲线  
Fig. 4 P-V curve of scenario 1

情景 2 结果如图 5 所示。红线对应  $Q=0$  时交流系统的原始状态, 其余均为加入 VSC-HVDC 后有功功率不变、改变无功功率的状态, 其中蓝线、绿线、黄线和黑线分别对应  $Q$  为 -300 Mvar、-150 Mvar、150 Mvar、300 Mvar 时的曲线。若  $Q$  为正值, 表示换流站向节点 16 注入无功功率; 反之, 表示换流站从节点 16 吸收无功功率。

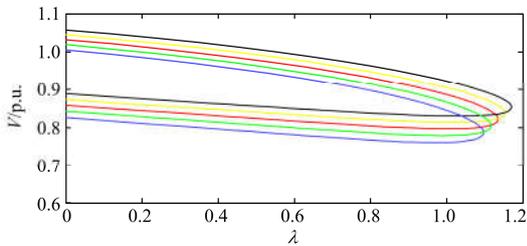


图 5 情景 2 所得 P-V 曲线  
Fig. 5 P-V curve of scenario 2

由图 4、图 5 根据判断 P-V 曲线鞍结分歧点的位置可以判断出不同的控制参数对系统负荷裕度的影响程度是不同的。

基于上述所得结果, 将所得数据进行图像处理得到的曲线分别如图 6、图 7 所示。

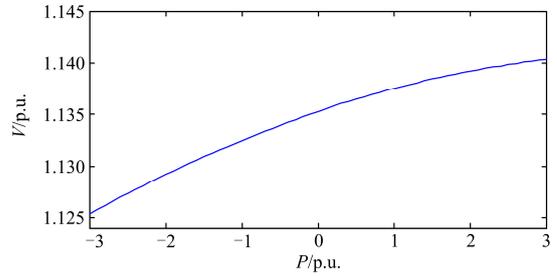


图 6 情景 1 拟合曲线  
Fig. 6 Fitting curve of scenario 1

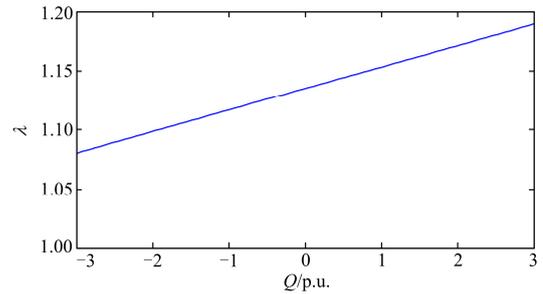


图 7 情景 2 拟合曲线  
Fig. 7 Fitting curve of scenario 2

由图 6、图 7 可以看出, 柔性直流线路传输有功功率和无功功率的变化对交直流系统的负荷裕度的影响是近似线性的。

应用文中提到的方法对加入 VSC-HVDC 的 IEEE39 节点系统进行负荷裕度灵敏度分析, 其传输的有功功率与无功功率变化时得到的节点 16 的负荷裕度灵敏度如表 2、表 3 所示。

表 2 参数  $P$  变化时的负荷裕度灵敏度

Table 2 Sensitivity of load margin when parameter  $P$  changes

$P/p.u.$	$L_p$
-3	0.007 8
-1.5	0.006 8
0	0.005 8
1.5	0.004 8
3	0.003 8

表 3 参数  $Q$  变化时的负荷裕度灵敏度

Table 3 Sensitivity of load margin when parameter  $Q$  changes

$Q/p.u.$	$L_p$
-3	0.018 24
-1.5	0.018 24
0	0.018 25
1.5	0.018 25
3	0.018 24

通过对系统负荷裕度灵敏度的计算结果进行分析, 得出系统处于不同运行状态时节点的负荷裕度灵敏度是不同的, 由系统的负荷裕度灵敏度变化拟合曲线可以看出: 随着控制参数的变化, 系统的负荷裕度灵敏度是近似线性变化的, 并且无功功率的变化对系统负荷裕度灵敏度影响较有功功率变化对电力系统要小。由图 6、图 7 可以看出 VSC-HVDC 的功率流向对系统的负荷裕度的影响, 若指定从节点 17 向节点 16 的功率传输为正方向, 则该功率传输会增加系统的负荷裕度, 相反则减少, 这是直流线路与交流系统相连的 PCC(Point of Common Coupling)点的负荷裕度灵敏度不同所导致的, 以控制变量为有功功率为例, 由于直流线路两端 PCC 点负荷裕度灵敏度不同, 同样的有功功率变化会导致它们的负荷裕度变化不同, 当调整参数使有功功率向一个方向传输时, 两端的 PCC 点的负荷裕度一端呈正变化(即提高负荷裕度)另一端呈负变化(即降低负荷裕度), 两端作用的共同结果决定了最后的负荷裕度即: 若最后所得的负荷裕度大于原始的负荷裕度, 则提高了系统的静态电压稳定性, 反之则是降低。

#### 4.2 IEEE118 节点系统分析

基于上述方法和文献[16]对 IEEE118 节点系统进行改造, 将支路 30-38 修改为 VSC-HVDC 支路, 其控制方式和换流站参数与上述算例相同, 所得结果如图 8、图 9、表 4、表 5 所示(节点 30 为例)。

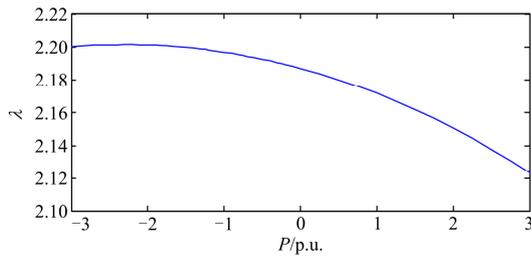


图 8 情景 1 拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve of scenario 1

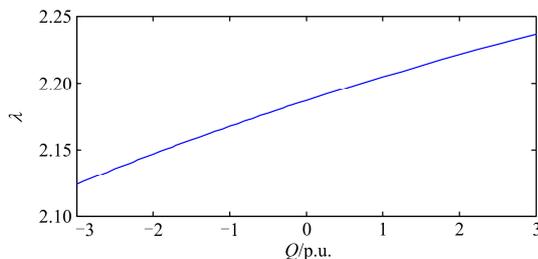


图 9 情景 2 拟合曲线

Fig. 9 Fitting curve of scenario 2

表 4 参数  $P$  变化时的负荷裕度灵敏度

Table 4 Sensitivity of load margin when parameter  $P$  changes

$P/p.u.$	$L_p$
-3	-0.003 3
-1.5	-0.004 5
0	-0.012 5
1.5	-0.020 8
3	-0.029 3

表 5 参数  $Q$  变化时的负荷裕度灵敏度

Table 5 Sensitivity of load margin when parameter  $Q$  changes

$Q/p.u.$	$L_p$
-3	0.022 8
-1.5	0.020 7
0	0.018 5
1.5	0.016 4
3	0.014 2

通过对改造后的 IEEE118 节点系统进行计算, 得到与改造后的 IEEE39 节点系统相同的结论, 以此验证了该方法的有效性。通过对系统节点负荷裕度灵敏度的计算, 可以比较准确地预测换流站在不同运行状态下的系统负荷裕度值, 从而为柔性直流输电系统的调度提供理论依据, 利用换流站的无功支撑能力有效地提高系统运行的电压稳定性。

## 5 结论

本文采用交直流连续潮流法对含 VSC-HVDC 的交直流系统进行负荷裕度分析, 通过对加入 VSC-HVDC 的 IEEE39 节点系统和 IEEE118 节点系统进行仿真计算, 得出了以下结论:

(1) 柔性直流线路传输有功功率和无功功率的变化对交直流系统的负荷裕度的影响是近似线性的, 无功功率的变化对负荷裕度的影响较有功功率的影响大。

(2) 系统中处于不同运行状态时节点的负荷裕度灵敏度是不同的, 随着控制参数的变化, 系统的负荷裕度灵敏度是近似线性变化的, 并且有功功率的变化对系统负荷裕度灵敏度影响较无功功率变化对电力系统的影响较为明显。

(3) 由于直流线路与交流系统相连的 PCC 点负荷裕度灵敏度不同, 两端作用的共同结果决定了最后的负荷裕度, 且 VSC-HVDC 的有功功率流向对系统的负荷裕度的影响是相反的。

## 参考文献

[1] 张谦, 廖清芬, 唐飞, 等. 计及分布式电源接入的配电网静态电压稳定性评估方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 42-48.

- ZHANG Qian, LIAO Qingfen, TANG Fei, et al. Steady state voltage stability assessment method of distribution network considering interconnection of distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 42-48.
- [2] 谭涛亮, 张尧, 武志刚. 交直流互联系统节点 PV 曲线的求取[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 28-32.  
TAN Taoliang, ZHANG Yao, WU Zhigang. Seeking PV curve of AC/DC hybrid power system[J]. Power System Technology, 2009, 33(11): 28-32.
- [3] 姜臻, 苗世洪, 尚亚男, 等. 基于电压崩溃指数的极限传输容量实用计算方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 213-221.  
JIANG Zhen, MIAO Shihong, SHANG Yanan, et al. Voltage collapse indices based method for practical computation of total transfer capability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 213-221.
- [4] 赵晋泉, 张伯明. 连续潮流及其在电力系统静态稳定分析中的应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(11): 91-97.  
ZHAO Jinquan, ZHANG Boming. Continuation power flow and its application in static stability analysis of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(11): 91-97.
- [5] 卫志农, 季聪, 王超, 等. 含 VSC-HVDC 的交直流系统内点法最优潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 89-95.  
WEI Zhinong, JI Cong, WANG Chao, et al. Interior-point optimal power flow of AC-DC system with VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 89-95.
- [6] 杨彬, 叶鹏, 孙保功, 等. 多种控制方式下 HVDC 系统的潮流计算[J]. 电网技术, 2010, 34(6): 139-143.  
YANG Bin, YE Peng, SUN Baogong, et al. A power flow calculation model for HVDC power transmission system under various regulation and control modes[J]. Power System Technology, 2010, 34(6): 139-143.
- [7] 李兆伟, 翟海保, 刘福锁, 等. 多馈入交直流混联受端电网直流接入能力研究评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 142-148.  
LI Zhaowei, ZHAI Haibao, LIU Fusuo, et al. DC access capability study for multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 142-148.
- [8] 赵晋泉, 范晓龙, 高宗和, 等. 含分布式电源的三相不平衡配电网连续潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 48-53.  
ZHAO Jinquan, FAN Xiaolong, GAO Zonghe, et al. Continuous power flow calculation of three phase unbalanced distribution network with distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 48-53.
- [9] 周玮, 姜汀, 胡妹博, 等. 基于两点估计法的交直流混合系统电压稳定概率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 8-13.  
ZHOU Wei, JIANG Ting, HU Shubo, et al. Probabilistic assessment on voltage stability of AC/DC hybrid systems based on two-point estimate method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 8-13.
- [10] LI S H, CHIANG H D. Nonlinear predictors and hybrid corrector for fast continuation power flow[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2007, 2(3): 341-354.
- [11] 王强钢, 周念成, 颜伟, 等. 采用背靠背变流器接入配电网改善低压微网电压质量的控制设计[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 171-181.  
WANG Qianggang, ZHOU Niancheng, YAN Wei, et al. Control design for voltage quality improvement of low voltage microgrid using back-to-back converter connected to distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 171-181.
- [12] 朱永强, 刘光晔, 廖庭坚, 等. 计及负荷电压静态特性的电力系统最小负荷裕度的快速评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 23-28.  
ZHU Yongqiang, LIU Guangye, LIAO Tingjian, et al. Rapid assessment of power system minimum load margin considering load voltage static characteristic[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 23-28.
- [13] 王云鹏, 韩学山, 孙东磊, 等. 考虑直流输电控制方式的受端电网电压稳定性机理分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(6): 35-41.  
WANG Yunpeng, HAN Xueshan, SUN Donglei, et al. Analysis on the mechanism of the voltage stability of the receiving end power grid considering the control mode of HVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(6): 35-41.
- [14] 凌卫家, 孙维真, 叶琳, 等. 浙江交直流混联受端电网静态稳定分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 164-170.  
LING Weijia, SUN Weizhen, YE Lin, et al. Static stability analysis of Zhejiang hybrid ultra-high voltage AC/DC receiving power grid[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 164-170.
- [15] 谭玉东, 李欣然, 蔡晔, 等. 基于动态潮流的电网连锁故障模型及关键线路识别[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 615-622.  
TAN Yudong, LI Xinran, CAI Ye, et al. Modeling cascading failures in power grid based on dynamic power flow and vulnerable[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 615-622.
- [16] 韩通, 陈艳波, 韩子娇, 等. 基于最优潮流的含 VSC-HVDC 交直流系统最大输电能力计算[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17): 113-121.  
HAN Tong, CHEN Yanbo, HAN Zijiao, et al. Optimal power flow based total transfer capability calculation for AC/DC system with VSC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17): 113-121.

收稿日期: 2017-03-07; 修回日期: 2017-06-26

作者简介:

王振浩(1964—), 男, 教授, 主要研究方向为柔性直流输电技术等; E-mail: zhenhaowang@126.com

由作宇(1992—), 男, 通信作者, 硕士, 主要研究方向为柔性直流输电等。E-mail: youzuoyu@163.com

(编辑 张爱琴)