

# 直流输电对电压稳定性的影响\*

周双喜, 吕佳丽, 张元鹏

清华大学 电机工程与应用电子技术系;

电力系统及大型发电设备安全控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084

**文摘** 与弱交流系统相连的高压直流系统被认为是引起电压不稳定的一个因素, 评价交直流系统电压稳定性的方法相当复杂。比较了研究交直流系统电压稳定性的几种方法的优缺点, 提出了建立在延拓法基础上的交直流系统电压稳定性的耦合分析方法。该法可以计及直流的不同控制方式和运行状态。分析了直流输电及其控制方式以及换流站不同无功补偿措施对电压稳定性的影响。实例计算表明, 换流站合适的无功补偿及直流控制方式有利于电压稳定。

**关键词** 延拓法; 高压直流; 静止无功补偿; 电压稳定性

**分类号** TM 712

高压直流(HVDC)输电由于没有交流输电那样的功角稳定问题, 功率调节快速以及运行可靠等优点, 非常适合于大功率、远距离输电和两个电力系统的互联。因此, 在国内外, 直流输电线路不断增加, 它在电网中所占比例不断提高。但是与交流系统连接的高压直流端给电力系统带来了不利的负荷特性。当HVDC为负荷地区提供电力时, 换流站消耗的无功功率约为直流有功功率的50~60%, 这使得与直流端相连的交流端的电压稳定性问题变得日益重要。与弱交流系统相连的HVDC系统被认为是引起电压不稳定的一个因素。由于直流端多种多样的控制方式和运行方式, 寻找一种评价交直流系统电压稳定性的方法相当复杂。

文[1]采用了一种简洁、快速地评估交直流系统电压稳定性的方法。文中基于不同短路比( $R_{sc}$ )时直流线的功率传输能力把交流母线短路比 $R_{sc}$ 的系统划为极弱系统,  $2 < R_{sc} < 3$ 的系统划为较强系统,  $R_{sc} > 3$ 的系统为强系统。这种方法主要是根据交流

系统的强弱来衡量换流站交流母线电压的稳定性, 也就是把直流输电作为换流站交流母线的负载, 以短路比大小来衡量交流系统的带载能力的强弱。此种方法虽然可以计及直流换流站的无功补偿, 但对直流本身的控制方式却难以反映, 所得的结果只具有参考价值。

文[2, 3, 4]中, 参照 $dQ/dV$ 判据, 以电压稳定性因子( $V_{SF}$ )作为稳定性的判据。这种方法不需对雅可比矩阵进行大的修改, 实现较为容易。该方法由于加入直流的控制方式, 因此可以对不同控制下的稳定性进行比较。但这种方法并没有计及实际直流运行中状态的转换, 同时给出的 $V_{SF}$ 因子只能定性判断系统是否稳定而不能确切地指出离失稳点还有多远。

文[5, 6]中, 提出了把崩溃点法和延拓法结合用于交直流系统电压稳定性的分析方法。这种方法在临界点附近的收敛性好, 并且能保证求得的工作点位于同一 $PV$ 或 $QV$ 曲线上, 避免了不同解组之间的跳跃问题。本文的工作是在此基础上, 把直流模式和交流模式统一起来, 并可考虑不同直流控制方式及其转换, 使交直流系统的电压稳定分析更加符合实际。

## 1 AC/DC 系统方程

在交直流系统中, 由于增加了直流端, 所以相应的功率方程和雅可比矩阵也要进行修改。

设与直流相连的交流端标号为 $t$ , 在加入直流后, 对与直流相连的交流端, 功率方程应该相应改为

$$P_{t,sp} - P_{t,ac} - P_{t,dc} = 0 \quad (1)$$

式中:  $P_{t,sp}$ 为直流端注入的功率量;  $P_{t,ac}$ 为交流负荷;  $P_{t,dc}$ 为直流端等效的输出功率量, 对整流端为正, 相当于负荷; 对逆变端为负, 相当于注入功率。

设 $X$ 为直流的控制变量,  $V, \theta$ 分别为与换流

收稿日期: 1998-06-23

第一作者: 男, 1941年生, 教授

\* 基金项目: 国家攀登计划B(85-35)



端相连的交流母线的电压和相角。则直流端等效的输出功率值  $P_{t,dc} = f(V_t, X)$ , 此时直流端的有功偏差变为

$$\Delta P_t(V, \theta, X) = 0 \quad (2)$$

无功的情况与此类似, 有

$$Q_{t,SP} - Q_{t,dc} - Q_{t,ac} = 0 \quad (3)$$

只是对无功来说,  $Q_{t,dc}$  在整流端和逆变端均为正, 也即在整流端和逆变端均为吸收无功功率, 而无功功率偏差为

$$\Delta Q_t(V, \theta, X) = 0 \quad (4)$$

此外, 直流的控制方程为

$$R(V_t, X) = 0 \quad (5)$$

加了直流输电线, 即加了式(2)(3)和式(5), 交直流系统功率方程为

$$\begin{bmatrix} \Delta P(V, \theta) \\ \Delta P_t(V, X) \\ \Delta Q(V, \theta) \\ \Delta Q_t(V, X) \\ \Delta R(V_t, X) \end{bmatrix} = 0 \quad (6)$$

而雅可比矩阵则相应修改为

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta P_t \\ \Delta Q \\ \Delta Q_t \\ \Delta R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & H & N & A \\ 0 & J & L & C \\ 0 & D & 0 & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E \\ \Delta E_t \\ \Delta F \\ \Delta F_t \\ \Delta X \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中  $H, N, J, L$  与交流系统雅可比矩阵相应分块的含义一样, 而  $A, C, D, E, F$  则是引入了直流输电后, 由于增加了变量而增加的相应矩阵分块。

## 2 直流系统运行方式

直流输电中的换流站如图 1 所示, 它既可作整流站, 也可作逆变站。

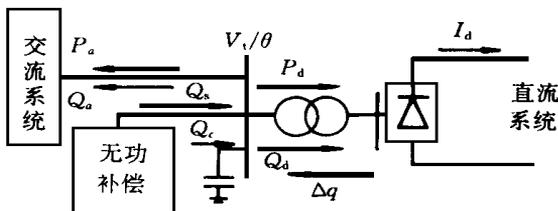


图 1 直流输电模型

无功补偿可采用电容器组, 调相机或静止无功补偿器(SVC)。

直流系统的运行通过控制整流侧和逆变侧的晶闸管触发角达到控制电压电流的目的。HVDC 的控制方式较多, 整流侧可能的控制方式有: 定电流

$I_{dN}$ , 定燃弧角  $\alpha$ , 定最小燃弧角  $\alpha_{min}$ , 定功率  $P_{dz}$ , 定整流侧变压器最大变比  $T_{max}$ , 定整流器变压器最小变化  $T_{min}$ 。逆变侧可能的控制方式有: 定最小熄弧角  $\gamma_{min}$ , 定电压  $V_{dN}$ , 定电流  $I_{dN}$ , 定功率  $P_{dN}$ , 定逆变侧最大变压器变比  $T_{max}$ , 定逆变侧最小变压器变比  $T_{min}$ 。

一般在正常运行时基本运行方式为: 整流端定电流控制并由换流变抽头调节控制触发角, 逆变端最小熄弧角控制并由换流变抽头调节控制电压。其他方式均是由于系统条件变化, 某些量越限, 由基本方式转化而来。本文所考虑的直流端限制主要有变压器变比限制, 无功补偿限制, 燃弧角(熄弧角)角度限制等。

综合换流端的理论控制模式和实际运行模式, 本文对在不同的越限方式下, 系统的运行方式转换的处理如下(其中每框中为 4 个常用的直流控制变量,  $\alpha$  为燃弧角,  $\gamma$  为熄弧角,  $I_d$  为直流线电流,  $V_d$  是相应的直流电压):

### A. 整流端交流母线电压 $V_{tr}$ 变化时

1)  $V_{tr}$  下降, 整流变压器变比  $T_r$  维持燃弧角  $\alpha$  而增大,  $T_r$  达到最大变化  $T_{max}$  时, 分接头失去调节作用,  $\cos\alpha$  增大即  $\alpha$  减小以补偿电压下降, 维持  $I_d$  恒定。此运行状态为:

$$\text{整流端: } T_r = T_{max}, I_d = I_{dN},$$

$$\text{逆变端: } \gamma = \gamma_{min}, V_d = V_{dN}.$$

2) 当  $V_{tr}$  继续下降时, 如  $\alpha$  减小到最小燃弧角  $\alpha_{min}$ ,  $T_r$  达到上限  $T_{max}$ , 则整流侧电压难以维持, 电流控制转移到逆变侧。(整流端和逆变端两端的电流整定值之间有电流裕度  $I_{dm}$ , 一般选择为额定直流电流的 10~15%), 此时逆变侧的变比维持在从 1) 转换时的数值。此时的运行状态如下:

$$\text{整流端: } T_r = T_{max}, \alpha = \alpha_{min},$$

$$\text{逆变端: } T_i = T_i^{SP}, I_d = I_{dN} - I_{dm}.$$

其中,  $T_i^{SP}$  是逆变侧从状态 1) 转换时的变化。

当  $V_{tr}$  进一步下降, 导致  $V_{dr}$ ,  $V_{di}$  随之下降幅度过大,  $\gamma$  增大到一定程度时, 直流系统停运。

3) 当  $V_{tr}$  升高时, 应减小  $T_r$ , 以使  $\alpha$  在一定范围, 当  $T_r = T_{min}$  时, 将不可能维持  $\alpha$ , HVDC 需减小  $\cos\alpha$ , 即增大  $\alpha$ , 以保持  $V_{dr}$  基本恒定, 此时运行状态为:

$$\text{整流端: } T_r = T_{min}, I_d = I_{dN},$$

$$\text{逆变端: } \gamma = \gamma_{min}, V_d = V_{dN}.$$

当  $\alpha$  增大到一定程度时, 直流系统停运。

### B. 逆变侧交流母线电压 $V_{ti}$ 变化时

1)  $V_{d1}$ 下降, 逆变变压器  $T_I$  为维持直流电压  $V_{d1}$  而增大,  $T_I$  达到  $T_{max}$  时, 分接头失去调节作用。此时运行状态为:

整流端:  $\alpha = \alpha_N, I_d = I_{dN},$

逆变端:  $\gamma = \gamma_{min}, T_I = T_{max}.$

2) 当  $V_{d1}$  升高时,  $T_I$  减小以维持  $V_{dN}$  恒定, 当  $T_I = T_{max}$  时, 直流电压维持不住, 此时的运行状态为:

整流端:  $\alpha = \alpha_N, I_d = I_{dN},$

逆变端:  $\gamma = \gamma_{min}, T_I = T_{min}.$

3) 当  $V_{d1}$  继续升高,  $T_I$  达到上限  $T_{max}$ , 则运行状态变为:

整流端:  $T_r = T_{max}, I_d = I_{dN},$

逆变端:  $\gamma = \gamma_{min}, T_I = T_{min}.$

4)  $V_{d1}$  继续升高,  $\alpha$  减小至  $\alpha_{min}$  增大, R 端无法控制  $I_d$ , 电流控制转移到逆变侧, 控制量为:

整流端:  $T_r = T_{max}, \alpha = \alpha_{min},$

逆变端:  $T_I = T_{min}, I_d = I_{dN} - I_{dm}.$

当  $V_{d1}$  升高时, 需减小  $\cos \gamma$ , 以补偿  $V_{d1}$  的上升, 保持  $V_{d1}, V_{dr}$  不变, 从而保证  $\alpha = \alpha_{min}$  约束的满足。当  $V_{d1}$  增大到一定程度,  $\gamma$  太大, 而使直流系统停运。

以上过程可表示为如下的图 2。

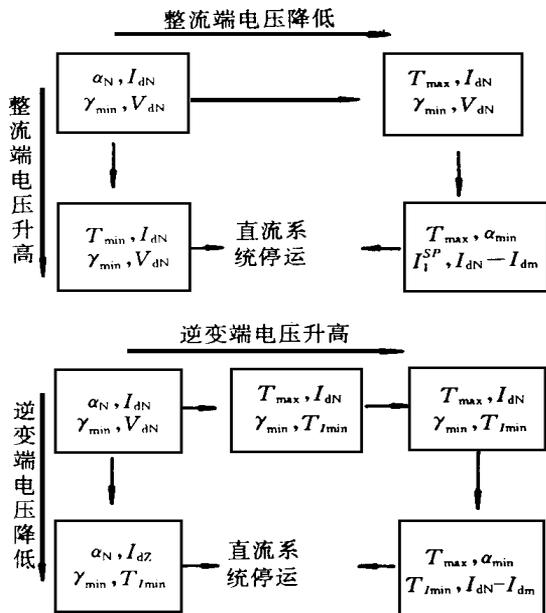


图 2 直流控制状态的转化

本方法具有的优点是:

- 采用改进的顺序法求解交直流潮流, 可更方便的实现直流部分因限制引起的控制方式的转换和换流变压器抽头离散调节等的作用。

- 将换流站母线的无功补偿归入交流系统, 可以更方便的实现多种无功补偿方式, 准确计及换流

站母线无功补偿设备的作用。

### 3 数字仿真实例

以本文方法对三机十二节点交直流并联系统图 3 进行计算分析, 通过延拓潮流法求解不同无功补偿方式和不同直流控制方式下的功率和电压裕度来分析它们对电压稳定的影响。

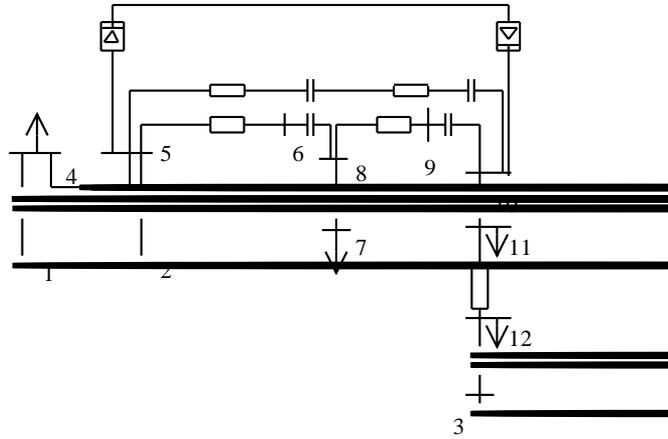


图 3 三机12节点的简单交直流系统的接线图

图 3 中短虚线为直流部分, 长虚线为与直流结果比较而虚设的交流线路。

#### 1) 不同无功补偿方式的比较

在节点 5 和 10, 用并联电容器, 恒定无功补偿和 SVC 进行无功补偿, 用延拓法计算, 得出结果是: 同样条件下, 并联电容器的功率裕度最小, 恒定功率补偿其次, SVC 最大, 分别为 15.868, 16.29, 16.4MW。即从功率裕度上看, 直流端并联 SVC 对电压稳定性最为有利。这个结论, 和用其他方法得到的结果是一致的。但是需要注意的是, 当 SVC 运行在容性区域时, 相当于并联电容, 此时它对电压稳定的影响是不利的。

#### 2) 交直流并联系统和双回交流系统电压稳定性比较

当交直流并联系统的整流端采用定电流控制, 逆变端采用定熄弧角控制的时候, 双回交流系统和交直流并联系统计算结果如表 1 所示。

表 1 交直流输电和交流输电的比较

形式	$P_{max}/MW$	负荷节点电压 $U_{11}$	负荷节点电压 $U_{12}$
双回交流	14.20	0.783	0.945
交直流并联	14.46	0.743	0.933

由此计算结果可以得知, 从电压稳定裕度或者

从功率裕度的角度来说, 交直流输电系统和双回交流输电, 都能够取得较高的电压稳定性, 而交直流并列输电更好一些。

### 3) 不同直流控制方式的影响

在直流控制方式合适的情况下, 直流输电可以得到比交流输电更好的电压稳定性。但是, 由于直流控制和运行情况的复杂性, 这样较好的电压稳定性, 并不一定总能够获得。当运行的情况改变, 比如说, 整流侧或逆变侧的变压器分接头没有调节到合适位置的时候, 或者由于其他的原因而导致逆变失败的时候, 高压直流输电反而不利于系统电压稳定性的提高。这使得建立正确的直流模型, 分析直流控制状态对具体系统的影响成为一项必需的工作。

## 4 结 论

本文在总结交直流系统电压稳定分析不同方法的基础上, 以基于延拓法的交直流耦合法对交直流输电系统进行电压稳定性分析, 实例仿真计算表明, 换流站无功补偿有利于电压稳定, 其中以 SVC 最好。直流输电对电压稳定的影响很复杂, 在合适的控制方式下, 交直流输电比单纯交流输电有利于电压稳定。交直流系统电压稳定性的耦合分析方法可以计及直流不同控制方式和运行状态, 是对实际情况较相符合的方法。实例计算证明了本方法的可行性。

## 参 考 文 献

- 1 徐 政 联于弱交流系统的直流输电特性研究之一: 直流输电的输送能力 电网技术, 1997, 21(1): 12~16
- 2 Franken B. Analysis of HVDC converters connected to weak AC systems IEEE Transaction on Power System, 1990, 5(1): 235~242
- 3 徐 政 联于弱交流系统的在直流输电特性研究之二: 控制方式与电压稳定性 电网技术, 1997, 21(3): 1~4
- 4 Hammad A E, Kuhn W. A computation Algorithm For assessing voltage Stability at AC/DC interconnection. IEEE Transactions on Power System, 1986, PWR5-1 (1): 209~216
- 5 Canizares C A, A lvarado F L. Point of Collapse and Continuation Methods for Large AC/DC Systems IEEE Trans On PWR5, 1993, 8(1): 1~7
- 6 Canizares C A, A lvarado F L, et al Point of collapse methods applied to AC/DC power systems IEEE Trans On PWR5, 1992, 7(2): 673~683
- 7 Arrillaga J. High Voltage Direct Current Transmission Peter Reregrinus Ltd London UK. IEE Power Engineering Series 6, 1983
- 8 Arrillaga J, Arnold C P. Computer Modelling of Electrical Power system. John Wiley & sons Ltd, 1983

## Influence of HVDC on voltage stability

ZHOU Shuangxi, LU Jiali, ZHANG Yuanpeng

Department of Electrical Engineering,

Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract** The high voltage direct current (HVDC) system connected with weak AC system is considered to be one of the causes for voltage instability. The methods for assessing AC/DC system voltage stability are very complex. Several methods for studying the voltage stability with HVDC links are discussed, and their advantages and shortcomings are compared. A coupled method for voltage stability of AC/DC system, which is based on continuation algorithm and considered the influence of DC control and reactive power compensation, is presented. Different kinds of DC control and reactive power compensation on the stability are introduced. Numerical examples prove that adequate inactive power compensate and DC control model can improve voltage stability.

**Key words** continuation method; high voltage direct current (HVDC); static inactive power compensate; voltage stability