

# AC/DC 系统电压稳定性的鞍结分岔分析

庄慧敏, 肖建

(西南交通大学 电气工程学院, 四川省 成都市 610031)

## Saddle-Node Bifurcation Analysis of Voltage Stability of AC/DC Power Systems

ZHUANG Hui-min, XIAO Jian

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan Province, China)

**ABSTRACT:** Due to high computational complexity and complicated mathematical model, not many research results of applying bifurcation theory to voltage stability analysis of AC/DC power system are reported. By use of a new differential algebraic equation (DAE) model and direct method of reduction, the authors calculate the saddle-node bifurcation (SNB) point and the calculation amount is reduced. Thus the analysis method of SNB can be applied in AC/DC power system that involves more DC branches. To discriminate the instability mode, the relevant factor theory is adopted. Case study of a 22-bus AC/DC power system validates the effectiveness of the proposed SNB analysis method.

**KEY WORDS:** voltage stability; differential algebraic equation (DAE) model; direct method of reduction; relevant factor theory; saddle-node bifurcation (SNB)

**摘要:** 采用新的微分代数方程模型和降阶直接法计算鞍结分岔点, 减少了分岔点的计算量。这使鞍结分岔分析方法可应用于直流线路较多的交/直流系统。为判别系统发生的失稳模式, 还引入了相关因子法。22 节点交/直流系统算例验证了所提出的鞍结分岔分析方法的有效性。

**关键词:** 电压稳定; 微分代数方程(DAE)模型; 降阶直接法; 相关因子法; 鞍结分岔(SNB)

## 0 引言

随着交/直流(AC/DC)系统的不断出现, 其电压稳定性问题也逐渐引起人们的重视。直流系统的换流设备在换流过程中要消耗大量的无功, 给电力系统

带来不利的负荷特性, 使得与交流端相连的交流母线电压稳定性受到威胁, 因此寻找一种分析 AC/DC 系统电压稳定性的方法显得非常重要。目前分析方法中, 静态分析法<sup>[1-3]</sup>较多, 动态分析法以特征分析法<sup>[4-6]</sup>为主。

分岔理论在一定程度上将动态稳定和静态稳定联系起来, 并提供了统一的数学分析基础, 是目前电压稳定研究的前沿领域。但该方法除了要进行大量的运算外, 还存在建模上的困难。目前只有少数文献运用该方法研究 AC/DC 系统的电压稳定性。文献[3]利用鞍结分岔理论分析了 AC/DC 系统的电压稳定性, 但该方法只局限于静态模型。文献[6]虽然采用了动态模型, 但计算量很大。

本文将采用微分代数方程(differential algebraic equations, DAE)模型以及降阶直接法计算鞍结分岔点, 还将引入相关因子法判别系统的失稳模式。

## 1 AC/DC 系统的微分代数方程模型

### 1.1 发电机及动态负荷模型

目前分岔计算所用的模型<sup>[7-9]</sup>是将交流系统的微分、代数方程和直流系统方程联立在一起, 每增加一条直流线路至少需要增加 11 个状态变量, 这使交/直流混合系统的代数微分模型非常复杂。本文基于消元思想, 先求解直流系统方程, 再和系统交流部分联立建立 DAE 模型。由于消除了直流变量, 总的状态变量数不随直流线路增加, 避免了维数灾难的发生, 减少了计算量。将直流系统方程作为单独的一个模块进行数值计算时, 如果直流系统运行方式发生切换, 只需调整直流模块的计算方程, 这样可简化程序的实现、维护和修正。

发电机和动态负荷数学模型是一组微分方程

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60774057); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20060613003)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC)(60774057); Project Supported by Special Scientific and Research Funds for Doctoral Specialty of Institution of Higher Learning (20060613003)。

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, I) \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{X}$  为微分变量构成的向量;  $\mathbf{Y}$  为代数变量向量, 一般由节点电压幅值及相角构成, 即  $\mathbf{Y}=(\mathbf{U}, \mathbf{d})$ ;  $I$  为控制参数。

## 1.2 直流系统模型

直流输电系统换流器  $i$  的数学模型<sup>[10-11]</sup>为

$$\begin{cases} U_{di} = k_0 B_i a_i U_{ti} \cos q_i - R_{ci} I_{di} \\ P_{di} = U_{di} I_{di} \\ Q_{di} = \sqrt{(k_1 B_i a_i U_{ti} I_{di})^2 - P_{di}^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $k_0 = 3\sqrt{2}/\pi$ ;  $R_{ci} = 3BX_{ci}/\pi$ ;  $k_1 = 0.995k_0$ ;  $U_{ti}$  为换流变压器  $i$  高压端母线电压有效值;  $a_i$  为换流变压器  $i$  的变比;  $B_i$  为换流器  $i$  的桥数;  $R_{ci}$  是换流器  $i$  的等值换相电阻;  $X_{ci}$  为单桥换流器  $i$  的电抗;  $U_{di}$  为换流器  $i$  的节点直流侧电压;  $I_{di}$  为换流器  $i$  节点直流侧注入电流, 流出节点为正;  $q_i$  为换流器  $i$  的控制角, 对整流器而言是延迟触发角, 对逆变器而言是超前熄弧角;  $P_{di}$  为换流器  $i$  的节点直流侧有功功率, 流出节点为正;  $Q_{di}$  为换流器  $i$  的节点直流侧无功功率。

直流线路方程为

$$\frac{dI_{di}}{dt} = \frac{1}{L_{di}} (U_{di} - U_{dvst}) - \frac{R_{di}}{L_{di}} I_{di} \quad (3)$$

对于两端直流系统,  $U_{dvst}$  为逆变器端直流电压。在多端直流并系统, 与直流换流站相连的系统运行电压即电压设定端<sup>[11]</sup>,  $U_{dvst}$  为该端直流电压。

控制方程可统一写成一阶微分方程

$$\dot{\mathbf{x}}_d = \mathbf{f}_d(\mathbf{x}_d, \mathbf{y}_d) \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{x}_d$  为控制变量;  $\mathbf{y}_d$  为控制变量以外的直流变量。

## 1.3 网络方程

交直流系统的网络方程为

$$\begin{cases} \mathbf{0} = \mathbf{P}_s - \mathbf{P}_{ac}(\mathbf{Y}) - \mathbf{P}_d \\ \mathbf{0} = \mathbf{Q}_s - \mathbf{Q}_{ac}(\mathbf{Y}) - \mathbf{Q}_d \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{P}_s$ 、 $\mathbf{Q}_s$  为电源及负荷的注入功率;  $\mathbf{P}_{ac}$ 、 $\mathbf{Q}_{ac}$  为注入交流系统的功率;  $\mathbf{P}_d$ 、 $\mathbf{Q}_d$  为注入直流系统的功率, 当节点不连接直流端时,  $\mathbf{P}_d$ 、 $\mathbf{Q}_d$  为  $\mathbf{0}$ 。

## 1.4 AC/DC 系统的 DAE 模型

目前采用的 DAE 模型是由上述的微分、代数方程组直接联立组成, 因为含有直流变量, 计算量大, 且计算复杂。为克服这一问题, 本文将直流系统方程解析或数值求解, 消除直流变量, 求解只含换流器端交流电压的直流功率。与交流系统方程联

立得到混合系统的 DAE 模型如下

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, I) \\ \mathbf{0} = \mathbf{P}_s - \mathbf{P}_{ac}(\mathbf{Y}) - \mathbf{P}_d(U_{t1}, U_{t2}, \mathbf{L}, U_{tm}) \\ \mathbf{0} = \mathbf{Q}_s - \mathbf{Q}_{ac}(\mathbf{Y}) - \mathbf{Q}_d(U_{t1}, U_{t2}, \mathbf{L}, U_{tm}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: 当节点不是换流站节点时,  $\mathbf{P}_d$ 、 $\mathbf{Q}_d$  为  $\mathbf{0}$ ; 而  $t_1, t_2, \dots, t_m$  为所有与直流网络相联结的交流系统节点编号。

式(6)可简写为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \end{cases} \quad (7)$$

该模型的变量不因直流系统的加入而增加。

## 2 鞍结分岔点计算方法

### 2.1 鞍结分岔点的特征方程

计算鞍结分岔(saddle node bifurcation, SNB)点的常用方法有连续法<sup>[9,12-13]</sup>和直接法<sup>[14-16]</sup>等。连续法通过追踪 PV 曲线来获取近似的 SNB 点。虽然该方法是比较可靠的一种方法, 但是计算速度慢。直接法通过求解非线性特征方程组求取 SNB 点。该方法需求解的非线性方程组比连续法潮流方程组的维数增加一倍, 初值的选取也较为困难。文献[16]提出一种降阶求解 SNB 点的方法。其特点是通过变量替换, 把直接法的  $2n+1$  维牛顿迭代方程组转变为 4 个同系数矩阵的  $n+1$  维线性方程组求解。该方法计算量小、易于用稀疏技术实现, 适合于模型复杂、计算量大的 AC/DC 系统的 SNB 点计算。

$I$  为参数, 系统的平衡解流形可表示为

$$\mathbf{F}(\mathbf{z}, I) = [\mathbf{f}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, I) \quad \mathbf{g}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, I)]^T = \mathbf{0} \quad (8)$$

用右特征向量表式的 SNB 点处的特征方程<sup>[16]</sup>为

$$\begin{cases} \mathbf{F}(\mathbf{z}, I) = \mathbf{0} \\ \mathbf{F}_z(\mathbf{z}, I) \mathbf{v} = \mathbf{0} \\ v_p - 1 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中向量  $\mathbf{v} \in \mathbf{R}^N$  ( $N$  为向量  $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{Y}$  的元素个数之和),  $v_p$  表示  $\mathbf{v}$  的第  $p$  个分量。

非线性方程组式(8)的牛顿迭代方程为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_z & \mathbf{0} & \mathbf{F}_\lambda \\ \mathbf{F}_{zz} \mathbf{v} & \mathbf{F}_z & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{e}_p^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{z} \\ \Delta \mathbf{v} \\ \Delta I \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{F}(\mathbf{z}, I) \\ \mathbf{F}_z \mathbf{v} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中:  $\mathbf{e}_p \in \mathbf{R}^N$ , 表示除第  $p$  个元素为 1 外其他均为 0 的电压列向量;  $\mathbf{F}_{zz} \mathbf{v} \in \mathbf{R}^{N \times N}$ , 其第  $i$  行、第  $j$  列元素定义为  $\sum_{k=1}^N (\frac{\partial^2 F_i}{\partial x_j \partial x_k} v_k)$ 。

## 2.2 系统雅可比矩阵的计算

由 SNB 点的特征方程可知, 计算 SNB 点必须先求解系统雅可比矩阵  $\mathbf{J}$ 。 $\mathbf{J}$  的计算步骤如下:

(1) 直流功率的计算。

由式(2)~(4)组成的直流系统模型是一个微分代数方程组

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_d = \mathbf{h}_1(\mathbf{U}_t, \mathbf{x}_d, \mathbf{y}_d) \\ \mathbf{0} = \mathbf{h}_2(\mathbf{U}_t, \mathbf{x}_d, \mathbf{y}_d) \end{cases} \quad (11)$$

设  $\mathbf{U}_t$  为已知量, 为避免产生交接误差, 本文采用文献[11]提出的联立求解法求解式(11)所需的直流功率  $\mathbf{P}_d$ 、 $\mathbf{Q}_d$ 。

(2) 直流功率偏导计算。

在数值变量计算过程中, 可用有限差分法计算所需要的导数<sup>[17]</sup>。 $\partial \mathbf{P}_d / \partial U_{tl}$  的逼近值为

$$\frac{\partial \mathbf{P}_d}{\partial U_{tl}} = \frac{\mathbf{P}_d(U_{tl}, \mathbf{L}, U_{tm}) - \mathbf{P}_d(U_{tl} + h, \mathbf{L}, U_{tm})}{h} \quad (12)$$

其它偏导计算公式可依此类推。根据经验, 可选  $h$  计算  $\mathbf{P}_d$  精度的平方根<sup>[17]</sup>。与顺序法相比较, 采用式(12)计算产生的误差很小。当该方法与牛顿法相结合时, 该式可在每次迭代时计算偏导数的近似值。

(3) 雅可比矩阵  $\mathbf{J}$  的计算。

当计算出直流功率对相应端交流电压的偏导数后, 可计算出交直流系统的雅可比矩阵

$$\mathbf{J} = - \begin{bmatrix} \mathbf{f}_X & \mathbf{f}_Y \\ \mathbf{g}_X & \mathbf{g}_Y \end{bmatrix}$$

当  $Y=U_{ij}$  时,

$$\begin{cases} \frac{\partial g_i}{\partial U_{ij}} = \frac{\partial P_{aci}}{\partial U_{ij}} + \frac{\partial P_{di}}{\partial U_{ij}} \\ \frac{\partial g_{i+1}}{\partial U_{ij}} = \frac{\partial Q_{aci}}{\partial U_{ij}} + \frac{\partial Q_{di}}{\partial U_{ij}} \end{cases} \quad (13)$$

式中  $\mathbf{f}_X$ 、 $\mathbf{f}_Y$ 、 $\mathbf{g}_X$  的计算和纯交流系统一样。

## 2.3 SNB 点计算步骤

(1) 建立初始控制方式下的直流系统计算模块。

(2) 选定系统状态变量和参量, 确定系统微分代数方程组(6)。

(3) 输入原始数据, 先数值求解直流系统方程, 然后运用常规潮流计算求出初始状态点。

(4) 采用文献[16]提出的赋初值法计算式(9)的迭代初值。

(5) 将步骤(4)计算结果中换流器端的交流电压代入直流系统计算模块, 判断直流系统控制模式是否需要发生切换。若需要则按新的控制方式求

解直流功率及偏导; 否则直接转入步骤(6)。

(6) 用文献[16]的方法迭代求解式(9), 直至迭代收敛。

## 2.4 算法的收敛性

牛顿法的收敛性较大程度上取决于初值的选取, 不当的初值易导致牛顿迭代法发散, 为此初值选取是直接法求解 SNB 点能否收敛的关键。文献[16]提出了一种利用负荷参数的二阶导数进行临界点预测的方法, 解决了直接法各状态变量及右特征向量初值难于确定的问题。文献[16]提出的 SNB 点计算方法具有良好的收敛性。

## 3 相关因子简介

对于状态方程  $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X}$ , 可以采用相关因子、相关比的概念来判别在  $|\mathbf{A}| \rightarrow 0$  时的趋零特征根是和发电机有功功率-转子角相关, 还是和负荷节点的有功功率、无功功率-电压强相关。前者为发电机转子功角稳定问题, 后者为电压稳定问题。通过特征根决定与哪个变量强相关, 从而判别如何采取措施来改善稳定问题。

第  $k$  个状态变量  $x_k$  与第  $i$  个特征根的相关因子  $P_{ki}$  为<sup>[17]</sup>

$$P_{ki} = \left| \frac{\mathbf{v}_{ki} \mathbf{u}_{ki}}{\mathbf{v}_i^T \mathbf{u}_i} \right| \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{v}_i$ 、 $\mathbf{u}_i$  分别为与  $\mathbf{L}_i$  对应的左、右特征向量;  $\mathbf{v}_{ki}$ 、 $\mathbf{u}_{ki}$  分别为左、右特征向量的第  $k$  个元素。 $P_{ki}$  是一个综合性指标, 可以很好地反映出某个节点状态变量与哪种失稳模式强相关。

$\mathbf{L}_i$  的电压稳定相关比为

$$r_i = \left| \frac{\sum_{x_k \in \Delta U, \Delta d} P_{ki}}{\sum_{x_k \in \Delta U, \Delta d} P_{ki}} \right| \quad (15)$$

$\mathbf{L}_i$  的功角稳定相关比为

$$r_{id_m} = \left| \frac{\sum_{x_k \in \Delta d_m, \Delta w} P_{ki}}{\sum_{x_k \in \Delta d_m, \Delta w} P_{ki}} \right| \quad (16)$$

若  $r_i \gg 1$ , 则系统失稳属于电压稳定问题; 若  $r_{id_m} \gg 1$ , 则系统失稳属于功角稳定问题。同理, 还可以定义动态负荷和高压直流输电与失稳模式之间关系的相关比  $r_{iL}$  和  $r_{iDC}$ 。

$$r_{iDC} = \left| \frac{\sum_{x_k \in \Delta U_{iDC}} P_{ki}}{\sum_{x_k \in \Delta U_{iDC}} P_{ki}} \right| \quad (17)$$

式中  $U_{DC}$  为与高压直流输电相连的交流节点电压幅值。

### 4 算例分析

#### 4.1 算例模型

图1为中国电力科学研究院6机22节点系统<sup>[11]</sup>。在节点11和12之间并联一条高压直流输电线路(节点12连接逆变器), 去掉20-1和21-22两条交流线路, 从而构成交直流输电线路并联的联合系统, 并去掉所有并联电抗器和电容器。G<sub>1</sub>为等值机, G<sub>6</sub>为调相机, 发电机G<sub>2</sub>~G<sub>5</sub>采用经典二阶简化模型, G<sub>1</sub>、G<sub>6</sub>采用E<sub>q</sub>'恒定模型, 励磁调节系统采用略去软反馈环节的二阶励磁系统。20节点负荷为恒定阻抗和异步电动机综合负荷, 其中动态负荷所占比例为90%, 采用机电暂态模型描述<sup>[18-19]</sup>, 其他负荷均为静态恒定阻抗模型。

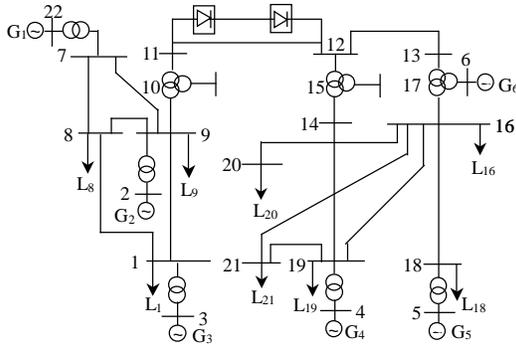


图1 交直流电力系统接线图

Fig.1 Connection diagram of AC/DC power systems

直流系统参数如表1所示。其基本运行方式为定电流-定熄弧角控制方式。为不失一般性, 取  $I_d=1.2$ ,  $K_I=3$ ,  $T_I=0.3$  s,  $K_{dI}=1.5$ ,  $g^0=18^\circ$ ,  $T_{dI}=0.3$  s。

表1 直流系统参数

| 参数          | 整流器   | 逆变器   |
|-------------|-------|-------|
| 节点号         | 4     | 5     |
| 换相电阻/pu     | 0.04  | 0.07  |
| 最小控制角/(°)   | 7     | 18    |
| 换流变调节范围/%   | ±15   | ±15   |
| 直流线路等值电阻/pu | 0.041 | 0.041 |

#### 4.2 计算结果及分析

##### 4.2.1 直流系统基本运行方式下的电压稳定性分析

考虑按相同的负荷增长率  $I$  增加负荷, 按如下步骤分析系统的电压稳定性:

(1) 利用本文的方法计算交直流系统发生SNB时的负荷比例因子以及零特征值对应的左、右

特征向量。

(2) 计算零特征值对应的节点参与因子。

(3) 计算功角稳定相关比和电压稳定相关比, 判别系统失稳模式。若为电压失稳, 则根据节点参与因子确定会发生电压失稳的节点。

(4) 计算动态负荷和高压直流输电与失稳模式之间的相关比  $r_{IL}$  和  $r_{iDC}$ , 确定导致电压失稳的主要原因。

初始潮流计算数据见表2。

表2 初始潮流数据

Tab.2 The data of initial power flow

| 系统元件           | P     | Q    | V    | 系统元件            | P     | Q     | V |
|----------------|-------|------|------|-----------------|-------|-------|---|
| G <sub>1</sub> | —     | —    | 1.00 | L <sub>8</sub>  | 4.87  | 2.44  | — |
| G <sub>2</sub> | 6.00  | 3.20 | —    | L <sub>9</sub>  | 3.76  | 2.21  | — |
| G <sub>3</sub> | 3.10  | —    | 1.00 | L <sub>16</sub> | 5.00  | 2.90  | — |
| G <sub>4</sub> | 1.60  | 0.70 | —    | L <sub>18</sub> | 4.30  | 2.60  | — |
| G <sub>5</sub> | 4.30  | 3.34 | —    | L <sub>19</sub> | 0.864 | 0.662 | — |
| G <sub>6</sub> | -0.01 | —    | 1.00 | L <sub>20</sub> | 0.719 | 0.474 | — |
| L <sub>1</sub> | 2.27  | 1.69 | —    | L <sub>21</sub> | 0.70  | 0.50  | — |

SNB点的  $I=0.1896$ 。对系统稳定性影响较大的节点参与因子(节点2至节点6的参与因子依次)为: 0.1002、0.1304、0.2163、0.3062、0.4027。节点22: 0.1573; 节点11: 0.1689; 节点12: 0.3689; 节点20: 0.6074。

由于  $r=20.9153 \gg 1$ , 且  $r_{d_m}=0.0913$ , 所以电压失稳。由上一步的参与因子可知会发生电压失稳的节点是: 位于逆变器侧的节点12、6、20、4和5。可见, 在AC/DC系统中除了与逆变器相连的交流母线的电压稳定问题比较突出外, 还有其他相关节点的电压不稳定问题也要引起特别的注意。

由  $r_{IL}=8.6714 \gg 1$ ,  $r_{iDC}=0.0369$  可知, 失稳是由动态负荷引起的, 且20节点的参与因子最大, 故电压失稳在动态负荷节点首先发生。

##### 4.2.2 直流系统控制方式对电压稳定性的影响

本文采用如下4种典型的控制方式计算混合系统的负荷裕度, 计算结果见表3。

控制方式1: 算例中的基本运行方式。

控制方式2: 定电流-定电压控制方式, 控制参数为:  $I_d=1.2$ ,  $K_I=3$ ,  $T_I=0.3$  s,  $U_d=1.0$ ,  $K_U=5$ ,  $T_U=0.3$  s。

控制方式3: 定功率-定电压控制方式, 控制参数为:  $P_d=1.0$ ,  $K_P=3$ ,  $T_P=0.3$  s,  $U_d=1.0$ ,  $K_U=5$ ,  $T_U=0.3$  s。

控制方式4: 定功率-定熄弧角控制方式, 控制参数为:  $P_d=1.0$ ,  $K_P=3$ ,  $T_P=0.3$  s,  $g^0=18^\circ$ ,  $K_{dI}=1.5$ ,  $T_{dI}=0.3$  s。

表3 不同控制方式下的 $I$ 计算值  
Tab. 3  $I$  of different control models

| 控制方式 | 方式1     | 方式2     | 方式3     | 方式4     |
|------|---------|---------|---------|---------|
| $I$  | 0.189 6 | 0.209 3 | 0.190 7 | 0.179 5 |

由表3可以看出:整流器定电流控制时系统的负荷裕度较定功率控制时大;逆变器定电压控制时系统的负荷裕度较定熄弧角控制时大。

#### 4.2.3 比例、积分环节系数对电压稳定性的影响

(1) 定电流-定熄弧角控制方式和定功率-定熄弧角控制方式。

定电流-定熄弧角控制方式下改变比例、积分环节系数,并分析它们对电压稳定性的影响,计算结果见表4。

表4 定电流-定熄弧角控制方式下参数变化后的计算结果  
Tab. 4 Calculation result after changing parameter under constant current-constant angle control model

| 参数变化情况        | $I$     | $r$      | $r_d$   | $r_L$   | $r_{DC}$ |
|---------------|---------|----------|---------|---------|----------|
| 减小 $K_I=1.5$  | 0.204 7 | 17.859   | 0.525 6 | 6.807 3 | 0.028 7  |
| 减小 $T_I=0.03$ | 0.189 5 | 33.003 4 | 0.018 6 | 2.986 1 | 0.246 7  |
| 增大 $K_F=3$    | 0.190 2 | 25.622 4 | 0.240 5 | 0.031 6 | 3.779 1  |
| 减小 $T_F=0.03$ | 0.189 7 | 1.004 8  | 0.993 7 | 0.679 2 | 0.597 9  |

将  $K_I=1.5$ ,  $T_I=0.03$  与基准参数相比可知:整流侧比例环节系数  $K_I$  对电压稳定性影响非常大,因此取值太大不利于稳定;而积分环节系数  $T_I$  对系统电压失稳模式影响不大。

将  $K_F=3$ ,  $T_F=0.03$  与基准参数相比可知:逆变侧的比例、积分环节系数对负荷裕度影响不大;但改变它们有可能导致系统失稳。如参数取  $T_F=0.03$  时,  $r$  和  $r_d$  都接近 1, 且  $r_L$ 、 $r_{DC}$  的值相近, 因此是混合失稳模式, 实际失稳情况将由具体扰动的性质来决定。

在定功率-定熄弧角控制方式下取 4 种类似情况计算, 其结果与定电流-定熄弧角控制方式下类似。

(2) 定电流-定电压控制方式和定功率-定电压控制方式。

定电流-定电压控制方式下取基准参数:  $r=24.151 4 \gg 1$ ,  $r_d=0.215 2$ ,  $r_L=4.671 5$ ,  $r_{DC}=0.083 7$ 。改变比例、积分环节系数, 并分析它们对电压稳定性的影响, 计算结果如表 5。

将  $K_I=1$  与基准参数相比可知:整流侧比例环

表5 定电流-定电压控制方式下参数变化后的计算结果  
Tab. 5 Calculation result after changing parameter under constant current-constant voltage control model

| 参数变化情况        | $I$     | $r$    | $r_d$   | $r_L$   | $r_{DC}$ |
|---------------|---------|--------|---------|---------|----------|
| 减小 $K_I=1$    | 0.236 8 | 27.538 | 0.172 2 | 6.058 3 | 0.034 2  |
| 减小 $K_U=1$    | 0.210 5 | 1.1204 | 0.896 6 | 0.694 0 | 0.307 4  |
| 减小 $T_U=0.03$ | 0.208 7 | 31.865 | 0.058 3 | 4.250 6 | 0.416 5  |

节系数  $K_I$  对电压稳定性影响较明显,  $K_I$  取值小可明显改善系统电压的稳定性。

将  $K_U=1$ ,  $T_U=0.03$  与基准参数相比可知:逆变侧的积分环节系数  $T_U$  对负荷裕度影响不大, 但改变比例环节系数  $K_U$  会在一定程度上影响负荷裕度。

在定功率-定电压控制方式下, 取 3 种类似情况进行计算, 其整流侧的比例、积分环节系数对电压稳定性的影响与定电流-定电压控制方式下相似。逆变侧比例环节系数  $K_U$  取值较大有利于系统稳定, 但  $K_U$  可能会导致系统失稳。这与定电流-定电压控制方式下  $K_U$  的分析结果并不一致, 说明逆变侧比例环节系数在不同控制方式下的影响不一定相同, 应具体问题具体分析。

## 5 结论

(1) 本文采用的数学模型是一种不含直流变量的 DAE 模型, 避免了直流线路较多时维数灾难的发生, 减少了计算量。

(2) 由于 AC/DC 系统的数学模型较 AC 系统复杂, 故采用一种降阶直接法求解 SNB 点。

(3) 本文引入相关因子法判别系统的失稳模式, 分析了直流系统控制方式及比例、积分环节系数对电压稳定性的影响。

## 参考文献

- 徐政. 联于弱交流系统的直流输电特性研究之二: 控制方式与电压稳定性[J]. 电网技术, 1997, 21(3): 1-4.  
Xu Zheng. Characteristics of HVDC connected to weak AC systems, part two: control mode and voltage stability[J]. Power System Technology, 1997, 21(3): 1-4(in Chinese).
- 吴红斌, 丁明, 李生虎. 直流输电模型和调节方式对暂态稳定影响的统计研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 32-37.  
Wu Hongbin, Ding Ming, Li Shenghu. Statistical research on the effects of HVDC models and controls to transient stability of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 32-37(in Chinese).
- 胡林献, 陈学允. 崩溃点法交直流联合系统电压稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(6): 395-398.  
Hu Linxian, Chen Xueyun. Point of collapse method applied to voltage stability analysis of AC/DC power system[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(6): 395-398(in Chinese).
- 吴杰康, 张飏, 陈国通. 运用特征值法确定交直流系统电压失稳区[J]. 继电器, 2006, 34(7): 27-31.  
Wu Jiekang, Zhang Biao, Chen Guotong. Voltage weak stability zone calculation of AC/DC system using eigenvalue method[J]. Relay, 2006, 34(7): 27-31(in Chinese).
- 潘丽珠. 高压直流输电对交流系统电压稳定影响的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2006.
- 马玉龙. 高压直流输电系统的稳定性分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2006.

- [7] 毛晓明, 管霖, 张尧, 等. 含有多馈入直流的交直流混合电网高压直流建模研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 68-73.  
Mao Xiaoming, Guan Lin, Zhang Yao, et al. Research on HVDC modeling for AC/DC hybrid grid with multi infeed HVDC [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 68-73(in Chinese).
- [8] 徐光虎, 王杰, 陈陈, 等. 基于微分代数模型的 AC/DC 系统非线性控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 52-57.  
Xu Guanghu, Wang Jie, Chen Chen, et al. Design of nonlinear controller for AC/DC power system based on differential algebraic models[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 52-57(in Chinese).
- [9] Fan Y K, Niebur D, Nwankpa C O. Saddle-node bifurcation of voltage profiles of small integrated AC/DC power systems[C]. Power Engineering Society Summer Meeting, NewYork, 2000.
- [10] 周长春, 徐政. 直流输电准稳态模型有效性的仿真验证[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 33-36.  
Zhou Changchun, Xu Zheng. Simulation validity test of the HVDC quasi-steady-state model[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 33-36(in Chinese).
- [11] Kundur P. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [12] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [13] Chiang H D, Flueck A J, Shah K S, et al. A practical tool for tracing power system steady-state stationary behavior due to load and generation variations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 623-634.
- [14] 郭瑞鹏, 韩祯祥. 电压崩溃临界点计算的改进零特征根法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 63-66.  
Guo Ruipeng, Han Zhenxiang. An improved zero eigenvalue method for point of collapse[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 63-66(in Chinese).
- [15] 刘永强, 严正, 倪以信, 等. 基于辅助变量的潮流方程二次转折点的直接算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 9-13.  
Liu Yongqiang, Yan Zheng, Ni Yixin, et al. An auxiliary-variable-based direct method for computing quadratic turning bifurcation points of power flow equations[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 9-13(in Chinese).
- [16] 江伟, 王成山, 余贻鑫, 等. 直接计算静态电压稳定临界点的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 1-6.  
Jiang Wei, Wang Chengshan, Yu Yixin, et al. A new method for direct calculating the critical point of static voltage stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 1-6(in Chinese).
- [17] 李兴源. 直流输电系统的运行和控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [18] 张建设, 张尧, 张志朝, 等. 直流系统控制方式对大扰动后交直流混合系统电压和功率恢复的影响[J]. 电网技术, 2005, 29(5): 20-24.  
Zhang Jianshe, Zhang Yao, Zhang Zhichao, et al. Influence of DC system control modes on voltage and power recovery after large disturbance in hybrid AC/DC systems[J]. Power System Technology, 2005, 29(5): 20-24(in Chinese).
- [19] Srivastava K N, Singh S N, Srivastava S C. Effect of multiple equilibrium on power system stability[J]. Electric Power Systems Research, 2000, 55(3): 165-172.

收稿日期: 2007-06-01。

作者简介:

庄慧敏(1976—), 女, 博士研究生, 从事电力系统电压稳定分析与控制方面的研究, E-mail: [zhmcyj@163.com](mailto:zhmcyj@163.com);

肖建(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 从事自动控制方面的研究。

(实习编辑 王晔)

(上接第 28 页 continued from page 28)

- [2] 刘明岩. 配电网中性点接地方式的选择[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 86-89.  
Liu Mingyan. Selection of neutral grounding modes in power distribution network[J]. Power System Technology, 2004, 28(16): 86-89(in Chinese).
- [3] 许颖. 对消弧线圈“消除弧光接地过电压”的异议[J]. 电网技术, 2002, 26(10): 75-77.  
Xu Ying. Discussion to “the limitation of ground arcing faults caused over-voltage by peterson’s coils”[J]. Power System Technology, 2002, 26(10): 75-77(in Chinese).
- [4] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [5] 李福寿. 中性点非有效接地电网的运行[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [6] 刘连睿. 10~35kV 系统弧光接地过电压的危害及解决办法[J]. 华北电力技术, 1999, 3: 22-23.  
Liu Lianrui. Endangerment and solution of arcing earth over-voltage in 10~35kV system[J]. North China Electric Technology, 1999, 3: 22-23(in Chinese).
- [7] DL/T 620-1997, 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].
- [8] 蔡亚萍. 10kV 配电网中性点灵活接地方式及接地故障检测系统的研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2002.
- [9] 陈维江, 蔡国雄, 蔡亚萍, 等. 10 kV 配电网中性点经消弧线圈并联电阻接地方式[J]. 电网技术, 2004, 28(24): 56-60.  
Chen Weijiang, Cai Guoxiong, Cai Yaping, et al. Neutral grounding mode in 10kV distribution network via peterson coil with parallel resistance[J]. Power System Technology, 2004, 28(24): 56-60(in Chinese).
- [10] 王晓刚. 10 kV 配电网中性点灵活接地方式及对铁磁谐振与弧光接地过电压的限制[D]. 北京: 华北电力大学, 2004.
- [11] 伍国兴. 10 kV 配电网中性点灵活接地系统控制器的研制[D]. 北京: 华北电力大学, 2004.
- [12] 吕军. 10 kV 配电网中性点经高阻接地方式下的内部过电压及接地故障选线、定位研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2006.
- [13] 中国电力科学研究院, 华北电网有限公司廊坊供电公司. 10 kV 配电网单相接地故障电弧自熄特性研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2007.
- [14] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [15] 陈维贤. 内部过电压基础[M]. 北京: 水利电力出版社, 1981.
- [16] 张纬钺, 何金良, 高玉明. 电力系统过电压绝缘配合[M]. 清华大学出版社, 2002.

收稿日期: 2008-01-17。

作者简介:

颜湘莲(1977—), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统过电压与绝缘配合, E-mail: [yanxl@epri.ac.cn](mailto:yanxl@epri.ac.cn);

陈维江(1958—), 男, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事电力系统过电压、绝缘配合以及电磁环境方面的研究工作, E-mail: [chenwj@whvri.com](mailto:chenwj@whvri.com)。

(编辑 杜宁)