

# 考虑换流器运行方式转换的 AC/MTDC 系统静态电压稳定分析

姜志勇, 胡林献, 于汀

(哈尔滨工业大学电气工程与自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 在 AC/MTDC 系统静态电压稳定分析中, 为充分考虑直流换流器不同控制方式之间的转换, 分析了多端并联直流输电系统各种控制模式, 提出了不同控制方式之间转换的整套策略。在考虑发电机功率限制以及直流参数越限导致控制方式转变的基础上用连续潮流法分析电压稳定。该方法用加入 3 端直流输电线路的新英格兰 10 机 39 节点算例系统进行测试, 结果表明, 本方法能够很好地处理电压稳定计算中由于运行条件的改变而导致的换流器运行方式转变。

**关键词:** 电力系统; 交直流; 多端并联; 运行方式; 电压稳定

## Steady voltage stability analysis of AC/MTDC system with transformation in different operation modes of converter

JIANG Zhi-yong, HU Lin-xian, YU Ting

(College of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In the steady voltage stability analysis of the AC/MTDC system, in order to consider the transformation in different control modes of the converter, all kinds of control modes in the parallel MTDC transmission system are analyzed in this paper. And the integrated strategy of the transformation in different control modes is also proposed. The voltage stability is analyzed in the continuation method, after considering the power limit of the generator and the control modes switching, which is caused by the change of operating conditions. This method is tested in the New England 10-machine-39-bus system, which is added a 3-terminal DC transmission line. It's proved that the control mode transformation in continuation method caused by the change of operating conditions can be settled correctly by the presented method.

**Key words:** power system; AC/DC; multi-terminal parallel; operation mode; voltage stability

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)24-0005-06

## 0 引言

由于在大功率、远距离、海底电缆送电和交流系统间非同步互联等方面, 直流输电相对交流输电有着明显的优势<sup>[1]</sup>, 近年来, 直流输电在我国得到了大的发展<sup>[2]</sup>, 交直流混合输电系统成为必然。与两端直流输电系统相比, 多端直流输电系统输电能力更强, 运行方式更加灵活, 是今后直流输电的一个发展方向<sup>[3]</sup>。多端直流系统的加入使得电压稳定问题更加复杂, 对交直流混合输电系统的电压稳定性研究就更为迫切。

多端直流输电系统有并联型和串联型两种, 由于串联型换流器绝缘要求高, 系统损耗大, 扩充困难等原因<sup>[4]</sup>, 使用比较少。因而大部分多端直流都为并联型。

直流系统调节主要通过两种途径: 换流器控制角和换流变压器电压比。其中, 前者控制速度是非常快的(1~10 ms), 这也是 HVDC 系统高度可控的

原因; 后者速度则慢的多(改变一档需要 5~6 s)。二者联合控制<sup>[5]</sup>, 控制角的快速调节使得直流参数符合要求, 换流变压器电压比的慢速调整则保证控制角在一定的范围之内。

直流系统的控制方式主要有定电流控制、定电压控制、定功率控制、定角度(整流器为触发角, 逆变器为熄弧角)控制和低压限流控制方式, 前四种为正常控制模式, 最后一种为保护性控制模式。其中定电流和定功率方式控制直流电流; 定角度和定电压方式控制直流电压。

文献[6~8]在计算交直流混合系统潮流时, 没有考虑换流站控制方式的改变或者只考虑了当整流侧电压降低、逆变侧电压升高时控制方式的转换, 文献[9]用连续潮流法分析交直流电压稳定性时也只考虑了整流器定电流、逆变器定电压控制的运行方式下, 当整流侧交流电压下降较多时, 整流器转为定角度, 逆变器转为定电流控制这一转换。文献[10]虽然对多种控制方式模型进行了电压稳定性评估,

但是却没有考虑到实际中条件的改变导致的运行方式改变,而且只分析了多馈入直流系统,对于多端直流系统没有进行讨论。可以看出,目前采用延拓法或连续潮流法来分析交直流电压稳定性的研究中,对于多种控制方式下复杂的转换过程没有进行过深入的探讨。

本文提出一种改进的多端直流/交流混合系统电压稳定性计算方法,该方法在常规连续潮流法的基础上,进一步对电网中发电机有功和无功的限制以及各种直流控制方式之间调整进行考虑,使得结果更能反映实际系统。

## 1 交直流系统的耦合

目前,交直流混合系统计算方法主要有两种,统一迭代法和交替迭代法,前者将交流系统和直流系统方程联立求解,该方法收敛性好,但是 Jacobi 矩阵维数大增,使得计算速度较慢;后者将交流系统和直流系统方程分别求解,虽然较前者编程容易,速度快,但是收敛性差,尤其在连续潮流法分析电压稳定性的过程中,在临近崩溃点时有可能不收敛。本文采用的变量消除法<sup>[11]</sup>相对于一般的交替求解法,由于在纯交流 Jacobi 矩阵中加入了耦合项,使得收敛性大大提高,又没有一般联合求解法 Jacobi 矩阵维数过大,计算时间较长的缺点。是一种兼顾速度和收敛性的交直流混合系统求解方法。

### 1.1 换流器基本方程

换流器的转换方程为:

$$V_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} K_T V_t \cos \theta_d - \frac{3}{\pi} X_c I_d \quad (1)$$

式(1)中:  $V_d$ 、 $I_d$ 、 $K_T$ 、 $X_c$  分别为直流电压、直流电流、换流变压器电压比和换流电抗;  $\theta_d$  为换流器控制角(对应整流器触发滞后角  $\alpha$  和逆变器熄弧超前角  $\mu$ );  $V_t$  为相连交流节点电压幅值。

### 1.2 直流网络关系方程组

换流器四种基本控制方式为:定电流控制方式、定电压控制方式、定功率控制方式、定控制角控制方式;换流器采取不同的控制方式,交直流系统之间的耦合程度差别很大。设某直流系统换流器分别采用这四种控制方式,则有方程:

$$\begin{bmatrix} I_{d1}^{sp} \\ I_{dV} \\ I_{dP} \\ I_{d\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{1V} & G_{1P} & G_{1\theta} \\ G_{V1} & G_{VV} & G_{VP} & G_{V\theta} \\ G_{P1} & G_{PV} & G_{PP} & G_{P\theta} \\ G_{\theta 1} & G_{\theta V} & G_{\theta P} & G_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{d1} \\ V_{dV}^{sp} \\ V_{dP} \\ V_{d\theta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:下标 I、V、P 和  $\theta$  分别表示采用定电流、电压、功率和控制角控制。上标 sp 的直流系统量表示控制量给定值。

对于定控制角方式的换流器,由式 1 得到:

$$I_{d\theta} = AA \times V_{t\theta} - BB \times V_{d\theta} \quad (3)$$

式中:  $AA$  和  $BB$  为对角阵,对角元素分别为:

$$aa_i = \frac{K_1}{K_2 X_{C\theta i}} \cdot K_{T\theta i} \cos \theta_{\theta i}^{sp} \quad (4)$$

$$bb_i = \frac{1}{K_2 X_{C\theta i}} \quad (5)$$

将式(3)代入式(2)中,即可得到直流电流和直流电压与换流器交流母线电压和给定直流控制量间的关系方程组,见式(6)。

$$\begin{bmatrix} V_{d1} \\ I_{dV} \\ V_{dP} \\ V_{d\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & 0 & G_{1P} & G_{1\theta} \\ G_{V1} & -1 & G_{VP} & G_{V\theta} \\ G_{P1} & 0 & G_{PP} & G_{P\theta} \\ G_{\theta 1} & 0 & G_{\theta P} & G_{\theta\theta} + BB \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_{d1}^{sp} - G_{1V} V_{dV}^{sp} \\ -G_{VV} V_{dV}^{sp} \\ I_{dP} - G_{PV} V_{dV}^{sp} \\ AA \times V_{t\theta} - G_{\theta V} V_{dV}^{sp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{1V} & R_{1P} & R_{1\theta} \\ R_{V1} & R_{VV} & R_{VP} & R_{V\theta} \\ R_{P1} & R_{PV} & R_{PP} & R_{P\theta} \\ R_{\theta 1} & R_{\theta V} & R_{\theta P} & R_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{d1}^{sp} - G_{1V} V_{dV}^{sp} \\ -G_{VV} V_{dV}^{sp} \\ I_{dP} - G_{PV} V_{dV}^{sp} \\ AA \times V_{t\theta} - G_{\theta V} V_{dV}^{sp} \end{bmatrix} \quad (6)$$

当直流系统不采用定功率控制方式时,关系方程组是线性的,可直接求出未知直流网络状态量;当有换流器采用定功率控制方式时,这些换流器对应的方程是非线性方程,可以先对采用定功率控制方式换流器的方程进行迭代,再将结果代入关系方程组即可求出其它直流网络状态量。

### 1.3 交直流接口

在求解交流系统方程时,可将直流系统用接在节点上的有功和无功负荷来等效:

$$P_d = V_d I_d \quad (7)$$

$$Q_d = I_d \cdot \text{Sign} \cdot \sqrt{\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} k_r K_T V_t\right)^2 - V_d^2} \quad (8)$$

式中:  $k_r$  为换相系数(一般取 0.995);  $\text{Sign}$  为换流器符号(整流器为正,逆变器为负)。

这样的话,连接有直流换流器的交流节点的功率方程则变为:

$$\Delta P = P_g - P_l - P_k - P_d = 0 \quad (9)$$

$$\Delta Q = Q_g - Q_l - Q_k + Q_c - Q_d = 0 \quad (10)$$

式(9)和式(10)中,下标为 g、l、k、d 分别为发电机功率、负荷功率、传送功率和直流注入功率;  $Q_c$  是无功补偿设备提供的无功功率。

相应的系统潮流 Jacobi 矩阵和纯交流系统的 Jacobi 矩阵也不相同,详细来说,节点功率方程对节点电压求偏导的元素要增加直流注入功率对电压幅值的偏导。即:

$$\begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} H & N - N_d \\ J & L - L_d \end{bmatrix} \quad (11)$$

通过式(11),把交流系统和直流系统耦合在一起。

## 2 直流运行方式转换策略

直流换流器有四种控制方式,分别为定电流控制 CI,定电压控制 CV,定功率控制 CP 和定角度控制 C $\theta$ 。控制角的快速改变使直流状态量符合控制量,然后控制换流变压器电压比使控制角回到合理的范围内。如果调整换流变压器电压比仍不能使控制角回到合理范围内的话,则考虑改变换流器的控制方式。必须注意在并联多端直流系统中,有且只有一个换流器控制直流系统电压。当有别的换流器从控制电流方式转换到控制电压方式时,原先控制电压的换流器必须转换为控制电流方式。本文提出的控制方式转变方法如图 1 所示。

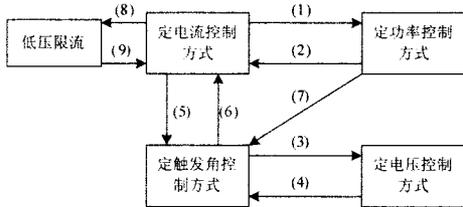


图 1 直流换流器控制方式转变方法

Fig.1 Transformation for control mode of converter

1) 换流器处于定电流控制模式,如果装设有定功率控制器,当传输功率下降到定功率控制额定值时,为了保证传输功率,则转变为定功率控制模式。

2) 换流器处于定功率控制模式,如果直流电压降低,使得保证功率的电流整定值大于最大电流限制,则转变为定电流控制方式。

3) 换流器处于定触发角控制模式,如果交流电压变化,使得直流电压超过要求范围时,如果装设有定电压控制方式,则转变为定电压控制方式,如果没有装设定电压控制方式,则调整换流变压器电压比使直流电压回归到要求范围之内。

4) 换流器处于定电压控制方式,如果电压下降使得换流变压器电压比到达限值且控制角到达最小值时仍不能保证电压控制值,则转变为定触发角控制方式。

5) 整流器处于定电流控制方式,当整流侧交流电压降低或逆变侧电压升高,使得换流变压器电压比到达限值且控制角到达最小值时仍达不到电流控制值,则转变为定触发角控制方式。原先控制电压的换流器则转换为定电流控制方式。

逆变器处于定电流控制方式,当整流侧电压升

高或逆变侧交流电压降低,使得换流变压器电压比到达限值且控制角到达最小值时,电流值仍超过电流控制值,则转变为定触发角控制方式,原先控制电压的换流器则转换为定电流控制方式。

6) 换流器处于定触发角控制方式,当原先控制电流的其它换流器由电流控制转变为定触发角控制方式或定电压控制方式时,相应地,本换流器转变为定电流控制。多端并联直流系统只能有一个换流器控制电压(定角度控制或是定电压控制),其余换流器控制电流(定电流控制或是定功率控制)。

7) 换流器处于定功率控制方式,如果换流变压器电压比到达限值且控制角到达最小值时仍不能保证功率控制值,则转变为定角度控制,相应地,原先控制电压的换流器转变为定电流控制方式。

8) 换流器处于定电流控制方式,如果控制电压的换流器的控制角和换流变压器电压比到达极限,直流电压值仍小于低压限流的最高电压值时,启动低压限流控制,使电流控制值相应下降。

9) 当直流电压上升到正常水平,电流控制值相应上升到正常整定值。

## 3 求解过程

本文的电压稳定性计算采用连续潮流法,第一次预估方向为切线预估,以后预估则采用前两个状态点的割线预估,这样做的好处是避开了在极限点附近无法求取切线的缺点。

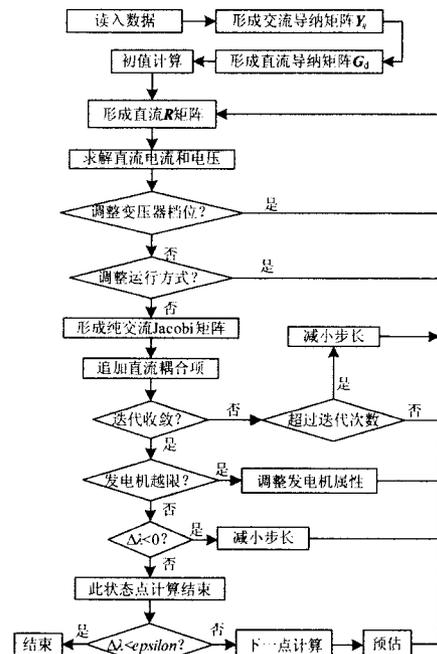


图 2 计算流程图

Fig.2 Process of continuous-power flow operation

在迭代过程中考虑发电机节点的功率限制以及直流换流变压器电压比改变和换流器运行方式的改变。具体处理流程见图 2。

### 4 算例分析

算例系统由新英格兰 10 机 39 节点系统和图 3 所示三端直流系统构成。取增长方式  $Y_d=Y_0$ ，当发电机有功功率或无功功率达到限制值时，则该量停止增长。在电压崩溃点附近，Jacobi 矩阵奇异，所以本方法以 Jacobi 矩阵最小模特征值作为崩溃点判据，当 Jacobi 矩阵最小模特征值的绝对值小于事先设定值，则认为到达崩溃点。

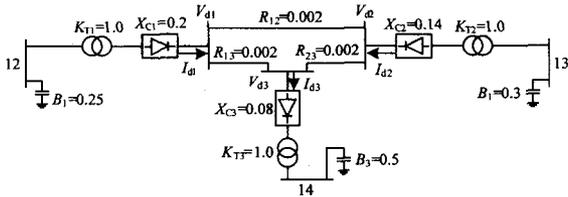


图 3 三端直流系统

Fig.3 Three-terminal DC system

发电机功率限制见表 1，平衡机不作限制；换流器装设有四种控制器，控制器的设定参数和换流器限制见表 2、3，初始控制方式和变压器电压比见表 4。

表 1 发电机功率限制

Tab.1 Generator limits

Generator	$P_{min} \sim P_{max}$	$Q_{min} \sim Q_{max}$
30	2.4~4	-1~2
32	4~8	-2~4
33	4~8	-2~4
34	3.5~7	-1.75~3.5
35	3.5~7	-1.75~3.5
36	3.5~7	-1.75~3.5
37	3.5~7	-1.75~3.5
38	5~10	-2.5~5
39	6~12	-3~6

表 2 直流控制器参数

Tab.2 DC controller parameters

	CI	CV	CP	C0	$K_T$
CI	0.436	1.25	0.5	5	$1.0 \pm 0.015 \times 10$
C2	0.48	1.25	0.6	5	$1.0 \pm 0.015 \times 10$
C3	0.82	1.25	1.1	15	$1.0 \pm 0.015 \times 10$

表 3 直流换流器限制

Tab.3 Converter limits

	$I_{min} \sim I_{max}$	$V_{min} \sim V_{max}$	$\theta_{min} \sim \theta_{max}$
C1	0.05~0.55	1.23~1.26	5~25
C2	0.06~0.60	1.23~1.26	5~25
C3	0.11~1.15	1.23~1.26	15~25

表 4 控制器初始状态

Tab.4 Initial DC control mode

换流器	C1	C2	C3
初始控制方式	CI	CI	C0
初始变压器电压比	1.0	1.0	1.0

计算精度  $\epsilon=1.0 \times 10^{-6}$ ，初始状态点计算结果见表 5，初始步长设为 0.5，经过 6 次计算后到达电压崩溃点，见表 6，电压崩溃点结果见表 7。

表 5 初始运行点计算结果

Tab.5 Results of initial operating point

$\lambda=0$	C1	C2	C3
$P_d$	0.548 255	0.603 689	1.149 84
$Q_d$	0.212 435	0.257 698	0.491 493
$V_d$	1.257 47	1.257 69	1.255 29
$I_d$	0.436	0.48	0.91
$\theta_d$	8.418 36	15.887	15
$K_T$	1	1	1
Mode	CI	CI	C0
$V_c$	1.003 6	1.017 68	1.015 95

表 6 各运行点  $\lambda$  和直流控制方式

Tab.6  $\lambda$  and DC control mode of operating points

计算点	参数 $\lambda$	负荷增长 模特征值	直流控制方式		
			C1	C2	C3
计算点 0	0	-0.651 279	CI	CI	C0
计算点 1	0.295 602	-0.586 201	CI	CP	CV
计算点 2	0.341 637	-0.519 377	CI	CP	CV
计算点 3	0.379 683	-0.450 149	CI	CP	CV
计算点 4	0.409 998	-0.334 840	CV	CP	CP
计算点 5	0.429 608	$-2.51 \times 10^{-2}$	C0	CP	CP
计算点 6	0.430 096	$-4.60 \times 10^{-4}$	C0	CP	CP

表 7 电压崩溃点计算结果

Tab.7 Results of the voltage collapse point

$\lambda=0.430 096$	C1	C2	C3
$P_d$	0.502 314	0.6	1.1
$Q_d$	0.192 993	0.210 259	0.504 443
$V_d$	1.149 89	1.150 31	1.147 7
$I_d$	0.436 837	0.521 598	0.958 435
$\theta_d$	5	5.167 29	15.817 9
$K_T$	1.15	1.09	1.12
Mode	C0	CP	CP
$V_c$	0.797 162	0.832 207	0.838 975

在电压崩溃点, Jacobi 矩阵最小模特征值趋于零, 发电机 32~39 的有功功率达到上限, 发电机 30、32、33、35、39 的无功功率达到上限。换流器 C1、C2、C3 控制方式从初始运行点的 C1、C1、C0 转变到电压崩溃点的 C0、CP、CP。

在不同初始运行方式下崩溃点计算结果如表 8 所示。

表 8 不同初始控制方式计算结果

Tab.8 Results of different initial control modes

C1	C2	C3	崩溃点 $\lambda$
C1	C1	C0	0.430 096
C1	C0	C1	0.430 053
C0	CP	C1	0.430 052
CP	CP	CV	0.429 808

在崩溃点的求解过程中, 如果控制方式变化频繁, 如本文算例, 则初始运行方式对最终崩溃点计算结果无大影响; 某些情况下, 求解过程中运行方式基本不改变, 初始控制方式则影响相对较大。

如果本文算例中三个换流站都只考虑定电流和定角度控制, 而不考虑定功率控制方式, 那么崩溃点计算结果为  $\lambda=0.441\ 265$ , 稳定裕度略有增加, 因为在崩溃点附近, 电压水平低, 为了保证传输功率而采取定功率控制方式将会导致无功需求增加, 对电压稳定有不良影响, 在无功裕度比较低的情况将更加严重。所以, 在电压稳定计算中, 如果不全面考虑换流器运行方式之间的转换, 所得结果可能偏离实际。

换流站 1 分别采用以下三种不同无功补偿方式, 计算结果见表 9。

方式 1: 全部由电容补偿 (容纳  $j0.25$ ), 见图 3;

方式 2: 50%由电容补偿 (容纳  $j0.125$ ), 50%由容量为 0.125 的调相机补偿;

方式 3: 全部由一台容量为 0.25 的调相机补偿。

表 9 不同无功补偿方式计算结果

Tab.9 Results of different voltage compensation modes

	补偿方式 1	补偿方式 2	补偿方式 3
崩溃点 $\lambda$	0.430 096	0.431 371	0.432 114
母线电压 $V_b$	0.797 162	0.811 807	0.815 115

相对于电容补偿来说, 增加调相机或静止无功补偿装置等调节特性较好的无功补偿设备, 可提高电压稳定水平。系统短路容量  $Q_s$  和直流功率  $P_d$  比值越小, 效果越明显。

## 5 结论

当前用连续潮流法研究多端直流/交流输电系

统的电压稳定性的研究中, 没有充分考虑直流换流器控制方式的改变, 而在实际情况中, 换流器的多种控制方式之间转变是比较复杂的, 根据这点, 本文提出一种换流器运行方式的转换方法, 并将其运用于交直流混合系统的电压稳定性分析中, 算例表明, 计算效果良好, 能够正确处理因交流参数的改变而导致的直流换流器运行方式的改变。考虑发电机功率限制和换流器控制方式改变之后, 使得结果更加符合实际情况。

## 参考文献

- [1] 浙江大学发电教研组直流输电科研组. 直流输电[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.  
The HVDC Transmission Research Team of Zhejiang University. HVDC[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1985.
- [2] 袁旭峰, 程时杰. 多端直流输电技术及其发展[J]. 继电器, 2006, 34(19): 61-70.  
YUAN Xu-feng, CHENG Shi-jie. Multi-terminal HVDC Transmission Technology and Its Development[J]. Relay, 2006, 34(19): 61-70.
- [3] 陆进军, 黄家裕. 一种高效灵活的电力系统多端直流潮流算法[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(6): 48-51.  
LU Jin-jun, HUANG Jia-yu. A Versatile Multi-terminal HVDC Power Flow Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(6): 48-51.
- [4] 陈谦, 唐国庆, 王浔. 多端 VSC-HVDC 系统交直流潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2005, (6): 1-6.  
CHEN Qian, TANG Guo-qing, WANG Xun. AC-DC Power Flow Algorithm for Multi-terminal VSC-HVDC Systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, (6): 1-6.
- [5] 刘崇茹, 张伯明, 孙宏斌. 交直流系统潮流计算中换流变压器分接头的调整方法[J]. 电网技术, 2006, 30(9): 22-27.  
LIU Chong-ru, ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin. A Method of Adjusting Tap of Converter Transformer for Load Flow Calculation of AC/DC Power System[J]. Power System Technology, 2006, 30(9): 22-27.
- [6] 陆进军, 黄家裕. 一种新的电力系统多端直流(MTDC)潮流算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12(3): 18-21.  
LU Jin-jun, HUANG Jia-yu. A New Multi-terminal MTDC Power Flow Algorithm[J]. Proceedings of the EPSA, 2000, 12(3): 18-21.

- [7] 陆进军,黄家裕.电力系统多端直流(MTDC)潮流算法改进[J]. 电力系统及其自动化学报, 2000,12(5): 4-7.  
LU Jin-jun, HUANG Jia-yu. An Improved Multi-terminal HVDC Power Flow Method[J]. Proceedings of the EPSA, 2000,12(5): 4-7.
- [8] 庄慧敏,肖建,黄彦全.AC/DC 系统潮流计算的部分直流变量消除法[J].西南交通大学学报, 2008,43(1): 8-13.  
ZHUANG Hui-min, XIAO Jian, HUANG Yan-quan. Partial DC Variable Elimination Method for Calculation of AC/DC Power Flow[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2008,43(1): 8-13.
- [9] 王秀婕,李华强,李波,等.基于连续潮流法及内点法的交直流负荷裕度算法[J].继电器, 2006, 34(22): 22-26.  
WANG Xiu-jie, LI Hua-qiang, LI Bo, et al. An Algorithm for Voltage Stability Assessment of AC/DC Power System Based on Continuation Method and Interior Point Theory[J]. Relay, 2006, 34(22): 22-26.
- [10] 欧开建,荆勇,任震.多馈入直流输电系统换流母线电压稳定性评估模型和算法[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(9): 24-26.  
OU Kai-jian, JING Yong, REN Zhen. Model and Algorithm for Accessing Voltage Stability at Commutation Bus in MIDC System[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(9): 24-26.
- [11] 胡林献,陈学允. AC/MTDC 系统电压稳定极限的计算[J]. 电力系统自动化, 1997,21(7): 34-37.  
HU Lin-xian, CHEN Xue-yun. Voltage Stability Limits Calculation of AC/MTDC Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(7): 34-37.

收稿日期: 2008-12-23; 修回日期: 2009-03-05

作者简介:

姜志勇(1986-),男,硕士研究生,研究方向为交直流混合系统电压稳定性分析; E-mail:jiangzy@yeah.net

胡林献(1966-),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事电力系统分析与控制方面的教学研究工作;

于汀(1984-),男,硕士研究生,研究方向为交直流混合系统电压稳定性分析。

(上接第4页 continued from page 4)

交易仿真系统项目组的原因,不确定性和可扩展性是其重要特征,本算法包含了国内已经出现的三种交易模式,成为交易仿真系统的核心模型,在国内可以为其他类似系统建设者提供模型,也可以为实际运行电力交易技术支持系统所借鉴或采用。

2) 一个成功软件系统主要特点是其包容性、代码的重用性和可读性,本算法正好体现了这一点,算法灵活,适应能力强,概念明确易于学习。

交易仿真系统最为显著的特点是灵活性、整体性和复杂性,它的灵活性是能适应各种交易模式和各式各样参数配置,这些从客观上决定了系统的复杂性,它的整体性是系统用统一的算法、统一的界面去实现不同的交易模式。

要想实现统一的算法以达到降低实现复杂度的效果,需要我们从中归纳、抽象出它们共同的东西,以便寻找统一的实现算法,降低复杂度。

## 参考文献

- [1] 尚金成,黄永皓,等.电力市场技术支持系统设计与关

键技术研究[M].北京:中国电力出版社,2002.

- [2] 张维,范玉宏.华中电力市场双边交易模拟分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(11): 97-102.

ZHANG Wei, FAN Yu-hong. Analysis on Bilateral Transaction Simulation of Central China Electricity Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(11): 97-102.

- [3] 王锡凡,王秀丽,陈皓勇著.电力市场基础[M].西安:西安交通大学出版社,2003.

收稿日期: 2008-12-19; 修回日期: 2009-02-16

作者简介:

韩文长(1966-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力信息化及电力交易; E-mail: hwcyp@sina.com.cn

唐学军(1965-),男,硕士,高级经济师,主要研究方向为电力市场、电力规划、电力技术经济;

张维(1966-),男,硕士,高级经济师,主要研究方向为电力市场、电力规划、电力技术经济。