

# 考虑直流系统开关特性控制的变步长仿真算法

王成山<sup>1</sup>, 高毅<sup>1</sup>, 王丹<sup>1</sup>, 曾沅<sup>1</sup>, 李鹏<sup>1</sup>, 张沛<sup>2</sup>

- (1. 电力系统仿真控制教育部重点实验室(天津大学), 天津市 南开区 300072;
2. 美国电力科学研究院, 美国 帕罗奥图市 94303)

## Variable-step Simulation Method Considering HVDC Controls With Switching Characteristics

WANG Cheng-shan<sup>1</sup>, GAO Yi<sup>1</sup>, WANG Dan<sup>1</sup>, ZENG Yuan<sup>1</sup>, LI Peng<sup>1</sup>, ZHANG Pei<sup>2</sup>

- (1. Key Laboratory of Power System Simulation and Control (Tianjin University), Ministry of Education, Nankai District, Tianjin 300072, China; 2. Electrical Power Research Institute of USA, Palo Alto 94303, USA)

**ABSTRACT:** The assumption of the AC commutating voltages being unchanged during the fast HVDC simulation can affect the results of the two-time-step transient stability simulation of the AC/DC power system. This effect and its origin are analyzed. The assumption may delay the action of some HVDC controls with switching characteristics, resulting in errors in simulation results, and may even cause misoperation of the HVDC switching controls in the case of the study of multi-infeed HVDC systems. A variable-step simulation method considering HVDC switching controls is proposed. It can make the HVDC switching controls act in time during the simulation. Both the conventional two-time-step method and the new variable-step method were implemented. Cases study shows that the proposed method can obtain a better accuracy than the conventional one, and the calculation efficiency is not eroded.

**KEY WORDS:** AC/DC power system; transient stability simulation; HVDC controls; switching characteristics; variable-step; multi-infeed HVDC

**摘要:** 分析在直流小步长仿真过程中假设换流母线的交流电压不变对交直流系统双时步暂态稳定性仿真结果产生的影响及原因: 该假设可能会延迟直流系统中一些具有开关特性的控制器的动作时间, 造成仿真结果不准确; 对于多馈入直流系统甚至可能引起直流开关特性控制的误动作, 从而使仿真结果失真。所提出考虑直流控制器开关特性的变步

长仿真方法, 可正确计及直流开关特性控制的动作时间; 实现传统的交直流双时步仿真方法和考虑直流开关特性控制的变步长仿真方法; 通过算例证明所提出的变步长方法结果是准确的, 且很好地保持了传统双时步方法的计算效率。

**关键词:** 交直流系统; 暂态稳定仿真; 直流控制; 开关特性; 变步长; 多馈入直流

## 0 引言

高压直流输电相对于交流输电具有很多优势<sup>[1]</sup>: 输电距离不受同步稳定性限制, 可进行非同步电网互联, 功率调节迅速灵活等, 在我国西电东送和全国联网中发挥了重要作用<sup>[2]</sup>, 而大规模的交直流电网互联也对交直流系统仿真技术提出了更高要求。在交直流电力系统稳定性仿真中, 直流换流器普遍采用准稳态模型<sup>[3-5]</sup>, 而根据对直流线路和直流控制模拟的详细程度, 相应模型可分为响应模型和详细模型<sup>[2]</sup>。文献[4]给出了直流换流器准稳态模型有效性的仿真验证。文献[5]指出响应模型无法精确模拟直流系统的换相失败<sup>[6-7]</sup>以及扰动后直流系统的恢复过程。文献[8]采用概率评估的办法分析了直流模型的选择对稳定性分析的影响, 文献[9]分析了直流传输功率对系统稳定性的影响。文献[10]根据响应模型的建模特点及其较高的计算效率, 指出它适合于交直流系统的规划研究和长过程仿真, 并认为可根据研究场合对详细模型进行一定程度的简化。文献[11]以南方电网为研究对象分别进行响应模型的建模和详细模型的建模, 指出详细模型的优势在于可准确模拟扰动后直流系统的恢复过程, 并提出对

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2009CB219700); 国家自然科学基金项目(5059412, 50625722); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(07D0001)。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB219700); Project Supported by National Natural Science Foundation of China(5059412, 50625722).

含有多馈入直流的交直流系统的稳定性分析要充分  
考虑直流控制的相互影响。文献[12]实现了采用直流  
详细模型的交直流系统双时步暂态稳定仿真方法，  
并假设在直流小步长仿真过程中换流母线的交流电  
压不变，通过与电磁暂态仿真的结果对比，验证了  
该方法的准确性以及所采取的假设的合理性。

本文首先描述稳定性分析所采用的直流系统  
模型，介绍直流系统具有开关特性的控制功能；然  
后指出考虑此类控制的作用时文献[12]方法的不足  
之处，并给出考虑直流系统开关特性控制的变步长  
仿真方法；最后通过算例证明本文方法的正确性和  
计算效率。

### 1 模型说明

#### 1.1 换流器模型

在稳定性仿真中采用换流器的准稳态模型，由  
一组代数方程描述<sup>[1-3,12-17]</sup>如下：

$$U_{DC} = N[(-1)^k \frac{3\sqrt{2}T_r}{\pi T_{tap}} U_{AC} \cos \alpha - \left(\frac{3X_c}{\pi} + 2R_c\right) I_{DC}] \quad (1)$$

$$\cos(\mu + \alpha) = \cos \alpha - \frac{\sqrt{2}T_{tap} I_{DC} X_c}{(-1)^k T_r U_{AC}} \quad (2)$$

$$\gamma = \pi - \alpha - \mu \quad (3)$$

$$\tan \phi = \frac{2\mu + \sin 2\alpha - \sin(2\mu + 2\alpha)}{\cos 2\alpha - \cos(2\mu + 2\alpha)} \quad (4)$$

$$P_{AC} = \frac{\sqrt{18}NT_r}{(-1)^k 2\pi T_{tap}} I_{DC} U_{AC} [\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu)] \quad (5)$$

$$Q_{AC} = P_{AC} \tan \phi \quad (6)$$

式中： $U_{AC}$ 为换流母线的交流电压幅值； $U_{DC}$ 和 $I_{DC}$ 为  
直流电压和电流； $N$ 为串联的换流桥个数； $X_c$ 和 $R_c$   
分别为换流变压器的电抗和电阻； $T_r$ 和 $T_{tap}$ 为换流变  
压器的变比和分接头位置； $\alpha$ 为触发滞后角； $\mu$ 为换  
相交叠角； $\gamma$ 为关断超前角； $\phi$ 为功率因数角； $P_{AC}$   
和 $Q_{AC}$ 为换流器吸收的有功和无功功率。当换流器处  
于整流工作状态时， $k=0$ ；当换流器处于逆变工作  
状态时， $k=1$ ，且 $U_{DC}$ 参考方向应反向， $I_{DC}$ 参考方  
向仍由高电位直流节点指向直流系统。图 1 为换流  
器模型示意图。

#### 1.2 直流线路模型

在稳定性仿真中，直流系统详细模型要考虑直  
流线路的动态特性<sup>[12]</sup>：直流电缆一般采用考虑电容  
效应的T型等值电路模型，直流架空线路一般采用

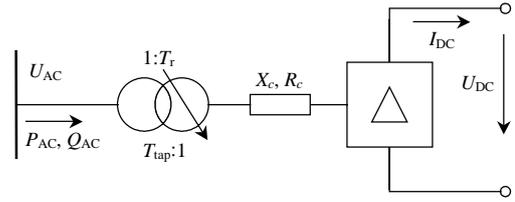


图 1 直流系统换流器模型示意图

Fig. 1 Illustration of HVDC converter

$L-R$ 串联电路模型；响应模型则采用电阻线路模型  
模拟直流线路<sup>[2]</sup>。图 2 为模拟直流电缆线路的T型等  
值电路模型，对应的数学描述为

$$\frac{dI_{DCr}}{dt} = \frac{U_{DCr} - U_c - R_{DC} I_{DCr} / 2}{L_{sr} + L_{DC} / 2} \quad (7)$$

$$\frac{dI_{DCi}}{dt} = \frac{U_c - U_{DCi} - R_{DC} I_{DCi} / 2}{L_{si} + L_{DC} / 2} \quad (8)$$

$$I_c = I_{DCr} - I_{DCi} \quad (9)$$

$$\frac{dU_c}{dt} = \frac{I_c}{C_{DC}} \quad (10)$$

式中： $U_{DCr}$ 和 $U_{DCi}$ 分别为整流侧和逆变侧的直流电  
压； $I_{DCr}$ 和 $I_{DCi}$ 分别为整流侧和逆变侧的直流电流；  
 $U_c$ 和 $I_c$ 分别为电容电压和电流； $R_{DC}$ 、 $L_{DC}$ 和 $C_{DC}$   
分别为直流线路电阻、电感和电容； $L_{sr}$ 和 $L_{si}$ 分别为整  
流侧和逆变侧的平滑电抗器电感。

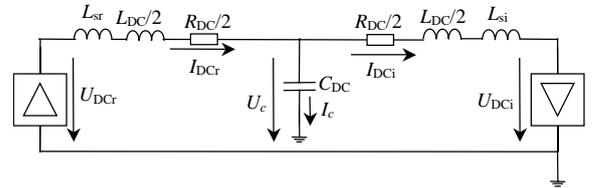


图 2 直流电缆线路模型

Fig. 2 Cable representation of DC line

对式(7)~(10)进行相应简化便可得到另外 2 种  
模型。忽略掉电缆模型中的电容，便得到直流架空  
线路的模型：

$$\frac{dI_{DC}}{dt} = \frac{U_{DCr} - U_{DCi} - R_{DC} I_{DC}}{L_{sr} + L_{DC} + L_{si}} \quad (11)$$

式中 $I_{DCr}=I_{DCi}=I_{DC}$ 。

忽略掉直流架空线路模型中的电感，就得到直  
流线路的电阻线路模型：

$$U_{DCr} - U_{DCi} = R_{DC} I_{DC} \quad (12)$$

#### 1.3 直流控制模型

直流控制系统分为 3 个层次<sup>[2,11]</sup>：主控制级、  
极控制级和阀组控制级。图 3 给出了直流控制系统  
的层次结构及传递的信号。在稳定性仿真中，直流  
系统响应模型和详细模型都对主控制级做了详细  
模拟。由于换流器采用了准稳态模型，所以 2 种模  
型都不模拟阀组控制级的作用，而对极控制级的模

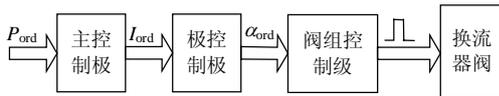


图3 直流控制系统层次

Fig. 3 Illustration of HVDC control arrangement

拟, 2 种模型有很大差别<sup>[2]</sup>: 详细模型模拟了整流侧考虑最小触发角限制的定电流控制器与逆变侧的定电压控制器、定熄弧角控制器和定电流控制器, 此外还有两侧都配备的低压限流控制器; 响应模型则作了简化处理, 认为极控制级响应速度足够快, 只模拟其响应特性而不模拟控制系统本身。

对于交流系统的故障<sup>[17]</sup>, 直流系统通过其暂态控制功能来应对扰动以保护直流系统并维持交直流系统的稳定运行。例如, 换流母线电压大幅下降时的闭锁和旁通操作<sup>[17]</sup>, 交流系统频率变化时的快速功率变化控制<sup>[2]</sup>等。

直流系统稳定性仿真模型模拟了重要的暂态控制<sup>[15-17]</sup>。响应模型通常包含直流系统闭锁和旁通的动作逻辑, 模拟方法是给定闭锁和旁通启动的电压阈值, 若换流母线电压低于此阈值则启动(可能要经过一个延时后启动)。详细模型也能模拟闭锁或者旁通操作, 并且可模拟直流系统的其他暂态控制功能。例如, 文献[15-16]所描述的详细直流模型: ABB公司的Kontek直流系统模型(CDCAB1), 模拟了紧急功率控制器(emergency power controller), 当换流器所连的交流系统电压或频率发生较大偏移时改变直流系统的功率指令; 模拟了整流侧暂态控制器(rectifier transient controller)和逆变侧暂态控制器(inverter transient controller), 都是当换流母线的交流电压低于设定值时启动, 改变极控制级控制器的触发角限幅值或熄弧角参考值; 模拟了逆变侧启动控制(inverter Gamma 0 start), 通过监测逆变侧直流电压和交流电压的变化, 若满足启动条件, 则在逆变侧电流控制器的输入即电流偏差量中增加一个电流指令值, 以帮助直流系统的恢复。

可见直流仿真模型所模拟的暂态控制常采用预先给定的电压阈值作为动作判据, 电压低于阈值时启动, 电压高于阈值时退出, 形成了一类具有开关特性的直流控制器。在针对单一预想事故的稳定性仿真中, 这种具有开关特性的直流控制的动作次数不多, 一般只有1次, 但是由于能够快速、大幅度地改变直流系统的功率指令或某些重要的控制参数, 直流系统的开关特性控制对于发生扰动后交直流系统的运行特性有着重要影响。

## 2 算法描述

图4中的常规计算模块描述了文献[12]报道的交直流系统双时步暂态稳定仿真算法在1个仿真时步内的流程。该方法通过对直流系统的积分计算采取小步长 $h_{DC}$ , 详细地模拟了直流线路和控制的快速动态, 见图4虚线框中的流程。而交流系统的积分步长 $h_{AC}$ 仍然采用交流基波周期的一半, 所以直流系统的详细模拟不会对整个系统的仿真计算效率产生太大影响; 并且, 在直流小步长仿真过程中假设换流母线交流电压不变。文献[12]指出这一假设降低了双时步仿真算法实现的复杂度, 并且通过算例证明了该假设的合理性。

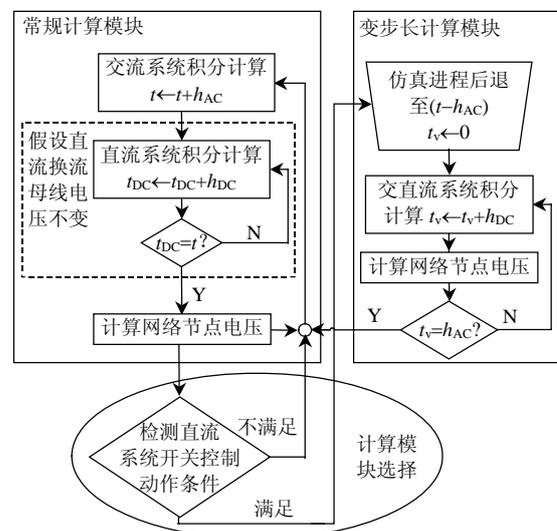


图4 考虑直流系统开关特性控制的变步长方法在1个仿真时步内的流程图

Fig. 4 Flowchart of one simulation step of variable step method considering HVDC switching controls

然而, 当在仿真中考虑直流系统的开关特性控制时, 发现采取上述假设使得此类控制只能在交流时步上动作, 而实际上, 直流开关特性控制可能在2个交流时步之间的某个时间点, 即某个直流时步上动作。所以上述假设可能会延迟直流开关特性控制的动作时间。由于直流开关特性控制往往能对交直流系统的运行状态产生较大影响, 所以其动作的延迟会造成仿真结果的偏差; 另外, 当考察含有多馈入直流的算例系统时发现, 某个直流系统开关特性控制的延迟动作可能造成其他直流系统开关特性控制的误动作, 最终导致仿真结果的失真。

针对上述问题, 本文提出了考虑直流系统开关特性控制的变步长仿真方法, 图4给出了该方法在1个仿真时步内的计算流程, 分为3个部分: 常规

计算模块、变步长计算模块和计算模块选择。将文献[12]的双时步方法作为常规计算模块，在每个时步的仿真计算中首先运行该模块。完成常规计算模块后，进行计算模块选择：检测直流开关特性控制的动作条件，若满足，则进入变步长计算模块；否则回到常规计算模块，进行下一时步的计算。在变步长计算模块中，首先将仿真进程退回到上一交流时步的起始时间点( $t-h_{AC}$ )，即将全系统所有的状态变量和代数变量恢复到( $t-h_{AC}$ )时的值。设定仿真步长为 $h_{DC}$ ，对这一时步进行交直流系统统一一步长的仿真。完成该时步计算后，回到常规计算模块，开始下一时步的仿真计算。可见，该方法只在直流开关特性控制动作时，才启动变步长计算模块，目的是准确计及直流开关特性控制的动作时间，从而克服文献[12]方法的上述问题；同时，由于直流开关特性控制在针对单一预想事故的仿真过程中动作次数很少，一般只动作 1 次，所以该方法可较好地保持文献[12]方法的计算效率。

### 3 算例验证

#### 3.1 算例说明

本文在暂态稳定仿真程序TSSP<sup>[18-19]</sup>的仿真框架下，采用改进欧拉法作为数值积分方法，构建了详细直流模型，其中换流器采用准稳态模型，直流线路采用考虑电容效应的T型等值电路模型，控制系统则参照文献[15-16]所描述的详细直流模型CDCAB1 的控制模型来实现，并将TSSP作为算例验证的仿真工具。

通过对 3 机 9 节点算例系统<sup>[20]</sup>进行扩展，构造出 2 个算例系统：1) 含有单一直流系统的算例系统，如图 5 所示；2) 含有双馈入直流系统的算例系统，如图 7 所示。系统参数见附录A。算例中所包含的发电机采用 6 阶模型，负荷采用恒阻抗模型，直流系统采用前段所述的详细模型。交流系统仿真步长取 0.01 s，直流系统仿真步长取 0.000 1 s。

分别采用 3 种方法进行仿真：1) 方法 1，全系统统一采用直流小步长仿真；2) 方法 2，文献[12]方法；3) 方法 3，本文方法。

以方法 1 的结果为标准，比较方法 2 和方法 3 的结果。

#### 3.2 算例 1

算例系统如图 5 所示，仿真时间为 3 s，0.1 s 时 5 号母线发生三相短路故障，0.2 s 时故障切除。设置逆变器旁通的动作判据如下：1) 启动条件，逆变侧

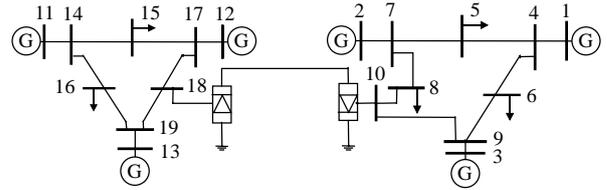
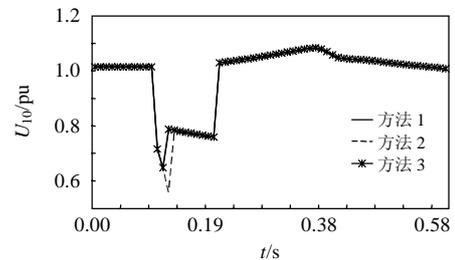


图 5 含单一直流的算例系统

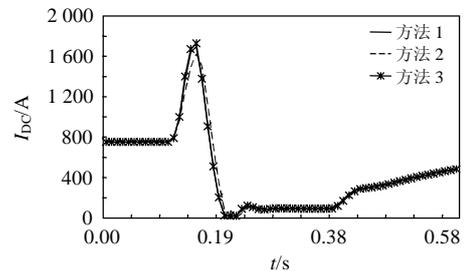
Fig. 5 Test system containing a single HVDC

交流换流母线电压低于 0.64 pu；2) 退出条件，旁通持续 0.1 s 且逆变侧交流换流母线电压高于 0.8 pu。

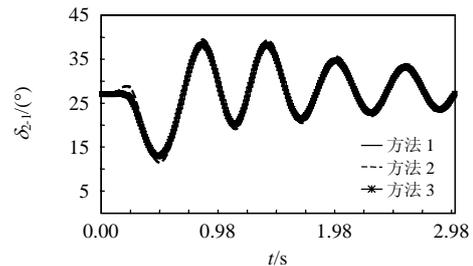
图 6 给出仿真比较结果。采用方法 1，0.110 5 s 直流系统逆变侧旁通；采用方法 2，旁通被推迟至 0.12 s，造成结果的偏差；采用方法 3，在 0.12 s 发现旁通动作的条件满足，将仿真进程退至 0.11 s 并进行全系统小步长仿真，在 0.110 1 s 旁通，结果准确。



(a) B10 电压幅值  $U_{10}$



(b) 整流侧直流电流  $I_{DC}$



(c) B2 和 B1 发电机相对功角  $\delta_{2,1}$

图 6 算例 1 的仿真结果

Fig. 6 Simulation results of case 1

#### 3.3 算例 2

算例系统如图 7 所示，仿真时间和故障操作同算例 1。设置 2 个直流系统逆变器旁通的动作判据：1) 启动条件，逆变侧交流换流母线电压低于 0.59 pu；2) 退出条件，旁通持续 0.1 s 且逆变侧交流换流母线电压高于 0.8 pu。

图 8 给出了仿真比较结果。采用方法 1，

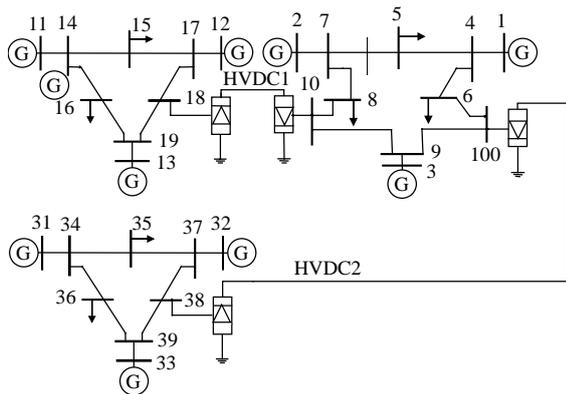
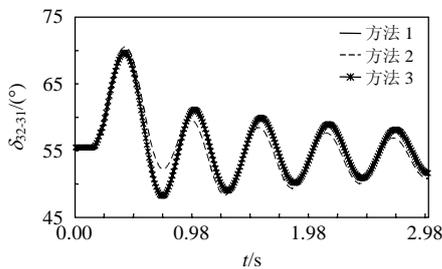


图7 含双馈入直流的算例系统

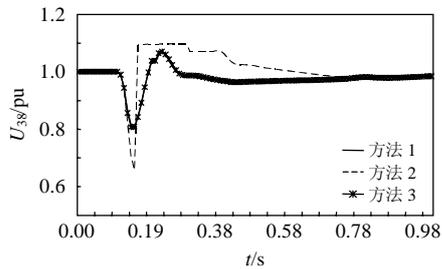
Fig. 7 Test system containing a double-infeed HVDC

0.117 7 s直流系统1 逆变侧旁通, 使受电系统电压得到恢复, 从而直流系统2 不会发生旁通; 采用方法2, 0.12 s 2个直流系统同时旁通, 扭曲了实际过程, 仿真结果失真; 采用方法3, 在0.115 3 s直流系统1 旁通, 直流系统2 不发生旁通, 结果准确。

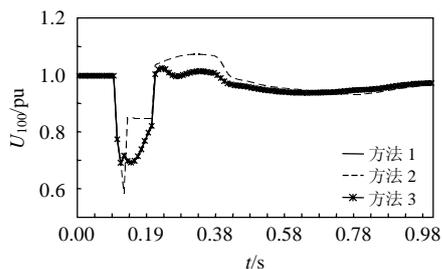
针对算例2, 上述3种方法的计算效率比较如表1所示。仿真所使用计算机的CPU主频为3.0 GHz。由于方法3要在0.11~0.12和0.21~0.22 s对全系统做小步长的仿真, 因此与方法2相比, 交流系统需要多进行200次小步长积分, 但对计算时



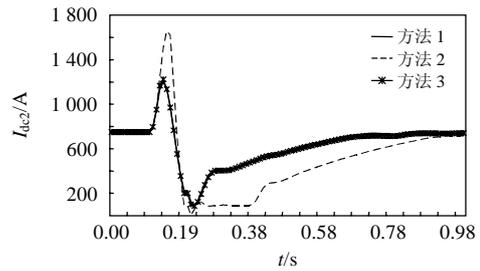
(a) B32和B31发电机相对角  $\delta_{2-31}$



(b) B38电压幅值  $U_{38}$



(c) B100电压幅值  $U_{100}$



(d) 直流系统2的整流侧直流电流  $I_{dc2}$

图8 算例2的仿真结果

Fig. 8 Simulation results of case 2

表1 算例2采用3种方法的计算效率比较

Tab. 1 Calculation efficiency comparison of case 2 using three methods

方法	交流系统积分步数	直流系统积分步数	仿真时间/s
方法1	30 000	30 000	13.734
方法2	300	30 000	2.094
方法3	500	30 000	2.109

间影响不大。

#### 4 结论

本文分析了在直流小步长仿真过程中假设换流母线的交流电压不变对交直流系统暂态稳定仿真结果的影响, 分以下2种情况讨论:

1) 对于单一的直流系统, 上述假设会延迟开关特性控制的动作时间, 造成仿真结果的偏差。

2) 对于多馈入直流系统, 上述假设可能会延迟某个直流系统开关特性控制的动作, 并进一步导致与其相邻的直流系统开关控制的误操作, 从而使仿真结果失真。

针对上述问题, 本文提出了考虑直流开关特性控制的变步长仿真方法, 将文献[12]的交直流双时步仿真算法作为本文方法的常规计算模块; 在直流开关特性控制动作时启动变步长计算模块, 通过全系统的小步长仿真准确计及直流开关特性控制的动作时间。算例结果证明本文提出的方法可解决文献[12]方法的上述问题, 获得准确的仿真结果, 并且较好地保持了文献[12]方法的计算效率。

#### 参考文献

- [1] 浙江大学发电教研组直流输电课题组. 直流输电[M]. 北京: 中国电力出版社, 1985: 8-17, 25-65.
- [2] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 2-5, 31-51, 114-127.
- [3] 中国南方电网公司. 交直流电力系统仿真技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 39-41.
- [4] 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).
- [5] 徐政, 蔡晔, 刘国平. 大规模交直流电力系统仿真计算的相关问题[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(15): 4-8.  
Xu Zheng, Cai Ye, Liu Guoping. Some problems in the simulation of large-scale AC/DC power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(15): 4-8(in Chinese).
- [6] 陈树勇, 李新年, 余军, 等. 基于正余弦分量检测的高压直流换相失败预防方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 1-6.  
Chen Shuyong, Li Xinnian, Yu Jun, et al. A method based on the sin-cos components detection mitigates commutation failure in HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(14): 1-6(in Chinese).
- [7] 何朝荣, 李兴源. 影响多馈入高压直流换相失败的耦合导纳研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 51-57.  
He Chaorong, Li Xingyuan. Study on mutual admittance and commutation failure for multi-infeed HVDC transmission systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 51-57(in Chinese).
- [8] 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).
- [9] 樊纪超, 余贻鑫. 交直流并联输电系统实用动态安全域研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(23): 19-24.  
Fan Jichao, Yu Yixin. Study on practical dynamic security regions of AC/DC parallel systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(23): 19-24(in Chinese).
- [10] Arabi S, Kundur P, Sawada J H. Appropriate HVDC transmission simulation models for various power system stability studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(4): 1292-1297.
- [11] 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. Researches on HVDC modeling for AC/DC hybrid grid with multi-infeed HVDC [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 68-73(in Chinese).
- [12] Brandt R M, Annakkage U D, Brandt D P, et al. Validation of a two-time step HVDC transient stability simulation model including detailed HVDC controls and DC line L/R dynamics[C]. 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Canada, 2006.
- [13] 庄慧敏, 肖建. AC/DC 系统的一类微分代数模型[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(34): 33-38.  
Zhuang Huimin, Xiao Jian. A kind of differential algebraic models of AC/DC power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(34): 33-38(in Chinese).
- [14] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 9-28.
- [15] Power Technologies Inc. Program application guide[M]. NY: Power Technologies Inc, 2002: 314-334.
- [16] 黄莹. 交直流电力系统动态特性分析方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [17] Kundur P. 电力系统稳定和控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 312-348, 356-358, 363-385.
- [18] 王成山, 张家安. 分布式暂态稳定仿真的面向对象分析与设计[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 27-30, 50.  
Wang Chengshan, Zhang Jia'an. Object-oriented analysis and design of distribution stability simulation[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 27-30, 50(in Chinese).
- [19] 王成山, 王丹, 郭金川, 等. 基于网式链表-双层结构的电力系统时域仿真算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(16): 6-10.  
Wang Chengshan, Wang Dan, Guo Jinchuan, et al. A power system time-domain simulation platform based on net-form chain and double layer algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(16): 6-10(in Chinese).
- [20] 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: 326-327.



王成山

收稿日期: 2009-05-22。

作者简介:

王成山(1962—), 男, 教育部长江学者特聘教授, 973 项目首席科学家, 主要研究方向为电力系统安全性分析、城市电网规划和配电系统自动化与分布式发电系统, cswang@tju.edu.cn;

高毅(1983—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统仿真, talentgaoyi@tju.edu.cn。

(责任编辑 谷子)