

基于 Matlab 的高压直流输电换相过程可视化

杨大春, 刘天琪, 李兴源

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 换相失败是直流输电系统中最常见的故障之一, 对电力系统的危害极大。一旦发生换相失败, 将导致直流功率无法正常送出及交流电压波形畸变。为了便于分析换相失败, 以换相过程的可视化为重点, 介绍了基于 MATLAB 的高压直流输电换相过程可视化程序的开发设计思想和总体结构, 阐述了该程序所具备的功能。换相过程可视化程序提供了良好的图形用户界面, 用户可以直观地观察到换相过程特别是换相失败时换流阀的导通状况及高压直流输电各种状态参数的波形, 便于分析各种因素对换相失败的影响。

关键词: 高压直流输电; 换相过程可视化; 换相失败

Visualization of the HVDC commutation process based on Matlab

YANG Da-chun, LIU Tian-qi, LI Xing-yuan

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Commutation failure which is one of the most common faults in HVDC transmission system does very great harm to the power system. When commutation failure happened, it leads to sending DC power abnormally and AC voltage waveform distortion. In order to facilitate the analysis for commutation failure, the ideas on design, the structure and the function of a program for visualization of the HVDC commutation process are presented in this paper. This program which bases on MATLAB with focusing on visualization of commutation process provides a good graphical user interface. Users can directly observe conduction state of converter valve and waveforms of HVDC various state parameters in commutation process especially for commutation failure through this program which facilitate the analysis of various factors on the impact of commutation failure.

Key words: HVDC transmission; visualization of the HVDC commutation process; commutation failure

中图分类号: TM76; TM721.1

文献标识码: B

文章编号: 1674-3415(2008)22-0077-05

0 引言

换相失败是直流输电系统中最常见的故障之一。当两个桥臂之间换相结束后, 刚退出导通的阀在反向电压作用的一段时间内, 如果未能恢复阻断能力, 或者在反向电压期间换相过程一直未能进行完毕, 都会在阀电压转变为正向时被换相的阀向原来预定退出导通的阀倒换相, 这称为换相失败^[1]。换相失败对电力系统危害极大。一旦发生换相失败, 将导致直流功率无法正常送出及交流电压波形畸变。若故障未及时清除或直流控制系统控制措施不当, 会出现连续换相失败, 使直流控制器不得不将直流闭锁, 导致直流功率传输中断, 影响系统稳定运行。

南方电网直流输电系统是我国“西电东送”中典型的多馈入直流与交流互联输电系统, 它涵盖了云南、贵州、广西、广东 4 省区, 其中, 云南电网和贵州电网通过贵广 I 直流、贵广 II 直流、天广直流及 6 条 500 kV 交流通道与广东电网互联。如果这些直流通道中的某个换流站发生换相失败^[2-5], 将导致直流输电短时中断, 连续换相失败时还会引发直流系统闭锁等后果, 多个换流站发生连续换相失败对受端系统的影响也是难以想象的。因此如何判断和避免换相失败的发生就显得非常重要^[6], 分析换相失败与那些因素有关以及各种因素对换相失败的影响程度具有重要的理论和现实意义^[7-10]。

为此, 以 Matlab 为开发平台, 本文介绍了高压直流输电换相过程可视化程序的实现方法及其在分析换相过程中的应用。通过此可视化程序, 可直观地观察到换相过程特别是换相失败时换流阀的情况

及高压直流输电各种状态参数的波形。可视化程序提供了良好的图形用户界面，用户可以通过控件方便地控制换相过程。

1 高压直流输电换相过程可视化程序的实现

1.1 开发平台

Matlab 作为强大的科学计算软件，提供了电力系统仿真工具箱(Simpower)，并且具有图形用户界面(GUI)的设计与开发功能^[11]。通过 MATLAB 设计的 GUI 程序可以用于分析在 MATLAB 电力系统仿真工具箱中建立的模型的仿真数据。MATLAB 为高压直流输电换相过程的可视化提供了良好的设计平台。

Matlab/GUI 和 Visual Basic 的编程思想是一致的，都是通过事件驱动的方式来实现对象的操作，其程序不是按照预定的“路径”执行，而是在相应不同的事件时，驱动不同的事件代码，以此来控制对象的行为。首先，按设计要求的屏幕布局，用系统提供的工具（控件）在屏幕上画出各种“部件”，即图形对象，并设置这些图形对象的属性，Matlab 自动产生界面设计代码。其次，编写实现程序功能的那部分代码。

1.2 界面设计

为了直观地显示高压直流输电换相过程和换相过程中高压直流输电各种状态参数波形的变化情况，在高压直流输电换相过程可视化程序的界面上，应该具有：换流器结构图、高压直流输电状态参数波形图、控制换相过程的控件。

其中，换流器结构图是通过静态文本框(Static text)控件实现的。通过改变静态文本框的方位和大小模拟换流器结构的各个部分，并通过改变静态文本框的背景颜色属性(BackgroundColor)使换流器结构的各个部分具有不同的颜色。高压直流输电状态参数波形图的显示由轴控件(Axes)来完成。

1.3 控制换相过程的控件及其触发事件流程图

为了便于在可视化程序中观察高压直流输电的换相过程，需要可视化程序达到以下功能：能控制换相过程动态显示的开始、停止和继续；换相过程能以不同的速度动态显示；可视化程序显示换相过程动态显示的当前时刻；可视化程序可以跳转到不同时刻的换相情况。

要达到上述功能，需要的控件有：“Start”键、“Stop”键、“Continue”键、可编辑文本框“time(s)”、可编辑文本框“Speed Changer”。“Start”键使换相过程从初始时刻 $t=0$ 开始动态显示；“Stop”键使换相过程停止；“Continue”键使换相过程从停止的时

刻起继续显示或从可编辑文本框“time(s)”输入的时刻起继续显示。在可编辑文本框“Speed Changer”中输入大于零的整数可以控制换相过程动态显示的速度，输入的数值越大，动态显示的速度越快；在可编辑文本框“time(s)”中，显示换相过程动态显示的当前时刻并可以通过输入时刻使换流器的换相情况跳转到输入时刻。这些控件的功能和触发的事件流程图如图 1 所示。

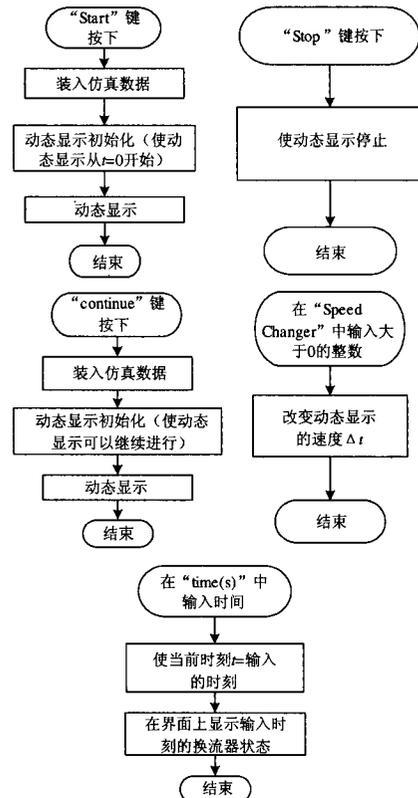


图 1 各个控件触发事件流程图

Fig.1 Flow chart of the various control trigger events

在图 1 中，“装入仿真数据”模块的功能是：装入用于动态显示高压直流输电换相过程的数据。“动态显示”模块的功能是使可视化界面上的高压直流输电换相过程按照时间顺序动态显示。图 2 为“动态显示”模块的流程图。

在图 2 中的“波形动态显示”模块设计思路：`getframe` 函数可截取每一幅画面信息而形成一个大列向量^[12]。在循环内，每执行一次 `getframe` 函数，依照 `axis_command`、`plot_command` 语句所画的图形就可在窗口上显示出来。`getframe` 函数起到刷新窗口的效果，通过循环就可以使一个窗口动态显示波形。

把上述思路应用到“动态显示”模块中，循环用“动态显示”模块的判断条件实现，“波形动态显

示”模块的程序为:

```
axis_command; %控制波形图的坐标范围
plot_command; %画波形图
getframe; %刷新窗口
```

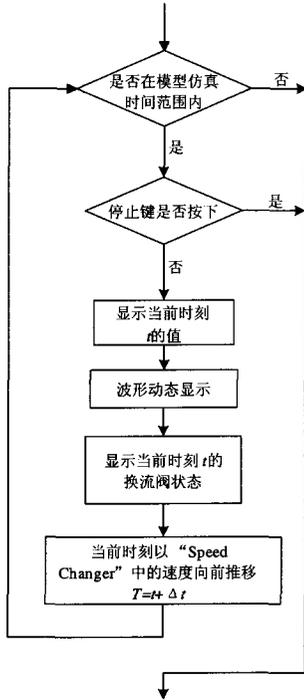


图 2 “动态显示”模块流程图
Fig.2 Flow chart of "Dynamic Display" module

在图 2 中的“显示当前时刻 t 的换流阀状态”模块设计思路:

判断“装入仿真数据”模块中代表当前时刻流过各个换流阀的电流数据是否为零: 等于零说明换流阀处于关断状态, 设置模拟换流阀的静态文本框的背景颜色属性为绿色; 不为零, 说明换流阀处于导通状态, 设置模拟换流阀的静态文本框的背景颜色属性为白色。

1.4 换相过程动态显示的实现

控制换相过程动态显示的方法是通过在各个

控件之间传递全局变量的值来改变输入“动态显示”模块的参数值^[13]。输入“动态显示”模块的全局变量有: 当前动态显示时刻 t , 停止键按下标志 key ($key=0$: “Stop” 键按下; $key=1$: 允许动态显示), 动态显示速度标志 Δt 。

按下“Start”键, 在其触发事件的“动态显示初始化”模块中, 使当前动态显示时刻 $t=0$, 停止键按下标志 $key=1$ 。这样, 接下来的“动态显示”模块就能实现从 $t=0$ 时刻开始动态显示。

按下“Stop”键, 使全局变量 $key=0$, 则“动态显示”模块判断“Stop”键按下, 退出循环, 停止动态显示。

按下“Continue”键, 在其触发事件的“动态显示初始化”模块中, 只改变全局变量值 $key=1$, 则接下来的“动态显示”模块判断“Stop”键没有按下, 实现继续显示的功能。

“动态显示”模块显示的下一时刻=上一时刻 + Δt , 在“Speed Changer”输入大于零的整数, 使全局变量 $\Delta t = \text{输入的整数} * \text{动态显示最小时间间隔}$ 。当时间间隔 Δt 被改变, 动态显示的速度也就发生了改变。

在“time(s)”中输入时刻, 使全局变量 t 等于输入的时刻, 则可视化程序界面上显示输入时刻的换流阀导通状态, “动态显示”模块的起始时刻为输入的时刻。

通过上述思路设计的高压直流输电换相过程可视化程序, 提供了良好的图形用户界面, 用户可以在界面上控制和观察换流器的换相过程和换相过程中高压直流输电各种状态参数波形的变化情况, 便于分析各种因素对换相失败的影响。

2 仿真分析

本文选择 Matlab 软件 Simulink 中的 power_hvdc12pulse (高压直流输电 12 脉波) 模型 (图 3) 进行仿真, 并采用由上述思路设计的高压直流输电

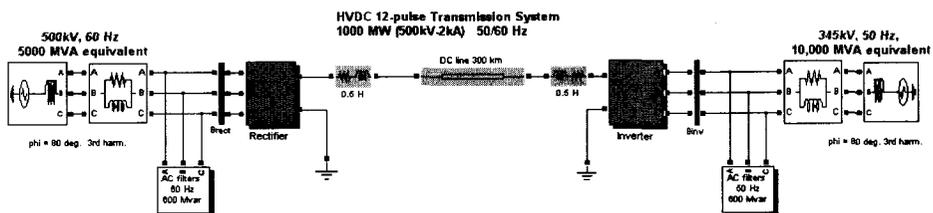


图 3 power_hvdc12pulse 模型
Fig3 Power_hvdc12pulse model

换相过程可视化程序观察和分析高压直流输电换相过程。在图 3 所示的模型中, 整流侧的交流系统 (500

kV, 60 Hz, 5 000 MVA) 向逆变侧的交流系统 (345 kV, 50 Hz, 10 000 MVA) 输送功率。

图 4 为用于上述高压直流输电模型的换相过程可视化程序。界面左上角为换流器结构图 (图 5), 用于模拟 power_hvdc12pulse 模型中直流系统。在换流器结构图中, 左侧为整流器, 右侧为逆变器, 连接两个换流器的直流输电线路为单极联络线。整流器和逆变器都是由两个三相全波桥式电路串联组成, 为 12 脉波换流器。

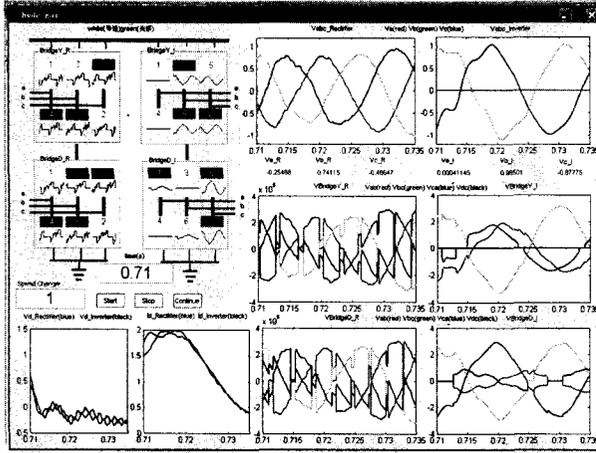


图 4 高压直流输电换相过程可视化程序

Fig.4 A program for visualization of the HVDC commutation process

在可视化程序界面上的三个按键从左到右依次为“Start”键、“Stop”键、“Continue”键, 按键左边的是可编辑文本框“Speed Changer”, 按钮上边的是可编辑文本框“Time(s)” (图 5)。

在可视化程序界面左下角上, 从左到右依次为直流电压波形 (整流侧、逆变侧), 直流电流波形 (整流侧、逆变侧), 如图 7。界面右半部分分为两列。左列从上到下分别是: 整流侧交流系统的三相交流电压 (相电压) 波形, 整流侧换流器上、下两个三相全波桥式电路输入端的交流电压波形 (线电压); 右列由上到下分别是: 逆变侧交流系统的三相交流电压 (相电压) 波形, 逆变侧换流器上、下两个三相全波桥式电路输出端的交流电压 (线电压) 波形。在界面左上角的 24 个换流阀的下面, 都有一个小波形图用来显示换流阀两端的电压, 如图 5。所有这些波形图横轴的左边界都为可视化程序界面上当前换流阀导通状态的时刻。

power_hvdc12pulse 模型仿真设置为: 逆变侧交流系统在 0.7 s 时发生 A 相单相接地故障, 持续时间为 0.05 s。

从图 4 所示的可视化程序上, 可以直观地观测到换相过程特别是换相失败的情况。图 5 显示了逆变侧交流系统在 0.7 s 时发生 A 相单相接地故障后

0.71 s 时高压直流输电 12 脉波模型的换相情况。从图 5 上看到, 逆变器中串联的两个三相全波桥式电路, 上一个 1、4、5 阀导通, 下一个 3、4、6 阀导通, 逆变器此时发生了换相失败现象。从图 4 上的逆变侧交流系统的三相交流电压 (相电压) 波形 (图 6) 看到, 此时逆变侧交流系统 A 相电压为 0.00041149 p.u., 说明逆变侧交流系统 A 相接地, 这是导致换相失败的直接原因。从图 4 的直流电压、电流波形 (图 7) 上可以看到, 所引起的换相失败使得直流电压开始跌落并逐渐趋近于零, 直流电流过冲并逐渐趋近于 2.0 p.u。从图 6、7 上可以看出, 由于直流甩负荷后引起交流过电压, 使换流变压器发生饱和, 最终导致逆变侧的交流电压严重畸变^[14]。

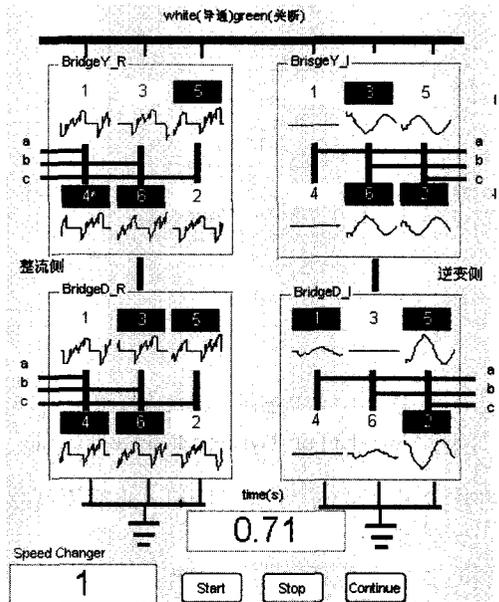


图 5 换流器结构图 (换流阀白色为导通, 绿色为关断)
Fig.5 Structure of the converter (converter valve for on-white, green for the shutdown)

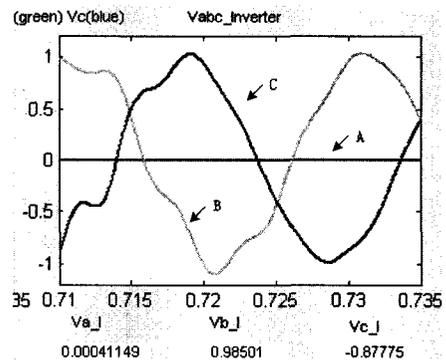


图 6 逆变侧交流系统的三相相电压波形

Fig.6 Phase voltage of AC system at the side of inverter

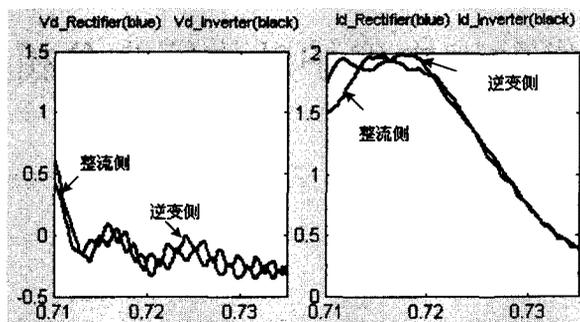


图7 直流系统电压、电流波形

Fig.7 DC system voltage and current waveforms

3 总结

基于 Matlab 设计的高压直流输电换相过程可视化程序, 显示了换流器中换流阀各个时刻的导通状态, 能直观地观测到换流器的运行情况、换相失败的时刻、换相失败时系统的具体情况, 便于分析各种因素对换相失败的影响。

参考文献

- [1] 浙江大学直流输电教研组. 直流输电[M].北京: 中国电力出版社, 1985.
- [2] 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.
- [3] Kundur P. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [4] 荆勇, 李立垚, 任震. 天广交直流系统并联运行的稳定控制[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(1): 49-52.
JING Yong, LI Li-cheng, REN Zhen. Stability Control of Tian-Guang AC and DC Parallel Transmission System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(1): 49-52.
- [5] 吴红斌, 丁明, 刘波. 交直流系统暂态仿真中换流器的换相过程分析[J]. 电网技术, 2004, 28(17): 11-14.
WU Hong-bin, DING Ming, LIU Bo. Analysis on Commutation Process of Converters in Transient Simulation of Hybrid AC/DC Power Systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(17): 11-14.
- [6] 何朝荣, 李兴源, 金小明, 等. 高压直流输电系统换相失败判断标准的仿真分析[J]. 电网技术, 2007,

31(1): 20-24.

- HE Chao-rong, LI Xing-yuan, JIN Xiao-ming, et al. Simulation Analysis on Commutation Failure Criteria for HVDC Transmission Systems[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 20-24.
- [7] Thio C V, Davies J B, Kent K. Commutation Failures in HVDC Transmission Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11 (2): 946-957.
- [8] Sood K V. Simulator Study of Hydro-Quebec MTDC Line from James Bay to New England[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3 (4): 1880-1886.
- [9] Wachal R W. Application of Electromagnetic Transient Simulation for the Solution of HVDC Control Problems[A]. In: IEEE WESCAMEX'95 Proceedings[C]. 1995.283-288.
- [10] Carroll D P. The Effect of System Frequency Spectrum on Commutation Failure in HVDC Inverters[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5 (2) : 1121-1128.
- [11] 阮沈勇, 王永利, 桑群芳. MATLAB 程序设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [12] 刘卫国, 陈昭平, 张颖. MATLAB 程序设计与应用[M]. 北京: 北京高等教育出版社, 2002.
- [13] 网冠科技. MATLAB 6.0 时尚创作百例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [14] Sood V K. 高压直流输电与柔性交流输电控制装置: 静止换流器在电力系统中的应用[M]. 徐政, 译. 北京: 机械工业出版社, 2006.

收稿日期: 2008-01-13; 修回日期: 2008-03-11

作者简介:

杨大春 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高压直流输电的建模和仿真, 电力系统稳定与控制; E-mail: yangdc1985@yahoo.cn

刘天琪 (1962-), 女, 教授, 博士生导师, IEEE 会员, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制、高压直流输电、调度自动化;

李兴源 (1945-), 男, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 从事电力系统稳定与控制、高压直流输电、分布式发电等研究。