

基于 EMTDC 的混合仿真算法研究

鄂志君, 房大中, 王立伟, 宋文南

(天津大学自动化学院, 天津 300072)

摘要: 针对现有混合仿真算法缺乏灵活性和通用性的问题, 提出了应用商业软件 PSCAD / EMTDC 实现混合仿真的方法。该方法可用 PSCAD 程序自带的元件图形库方便地搭建柔性交流输电系统 (FACTS) 元件及其控制器电路, 对其进行精确的电磁暂态仿真; 其间可以调用嵌入的机电暂态仿真程序 (TSP) 对外部系统进行功角仿真, 从而实现全系统的混合仿真。新方法不用编制电磁暂态仿真程序, 简化了仿真过程, 提高了混合仿真的可靠性。

关键词: 暂态稳定仿真; 混合仿真; PSCAD / EMTDC; 柔性交流输电系统

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897 (2005) 08-0047-05

0 引言

随着大量电力电子设备如高压直流输电 (HVDC) 和柔性交流输电系统 (FACTS) 引入电力系统, 电网的运行控制变得更趋复杂。为了提高电网安全稳定分析水平, 有必要对含有这些设备的电力系统进行有效的数字仿真。机电暂态仿真程序 (TSP) 对于研究电力电子器件内部故障过程、控制方法和对整个系统行为的影响具有很大的局限性; 现有的商业电磁暂态仿真程序 (如 EMT) 受计算机计算和存储能力的限制, 难以对大型电力系统进行全网电磁仿真。为弥补上述两方面的不足, Hefferman M. D. 等^[1]首次提出混合仿真的方法: 将系统分成交、直流两个子系统, HVDC 使用电磁暂态模型进行电磁暂态仿真; 交流系统使用准稳态模型进行机电暂态仿真。混合仿真算法既精确地反映了非线性电力电子器件的动态特性, 又具有较高的仿真效率。Reeve J., Anderson G. W. J., Sultan M. 等^[2-4]随后提出了减小电力电子器件产生的谐波对交流系统计算影响的方法。以上混合仿真算法都需要建立 HVDC 或 FACTS 器件及其控制器的电磁暂态模型, 并编制仿真程序模拟器件内部复杂的电磁暂态过程, 不同的器件、不同的控制策略需要编制不同的程序, 缺乏灵活性和通用性。

针对目前混合仿真算法存在的问题, 本文提出了直接应用商业电磁暂态仿真软件 PSCAD / EMTDC 实现电力系统混合仿真的方法。新方法可在 PSCAD 程序图形界面下构造电磁暂态仿真系统, 而不用编制电磁仿真程序代码, 从而使仿真过程大大简化, 提高了混合仿真的可靠性, 其仿真结果输出明

了直观, 可以方便地进行结果分析。这种方法可以推广应用于含高压直流输电 (HVDC) 或其它 FACTS 元件的电力系统混合仿真。采用本文方法对含 SVC 的 IEEE 3机 9节点系统进行了故障仿真, 通过与全网电磁仿真结果的比较, 说明了本文方法比传统混合仿真法更精确地模拟了 SVC 系统扰动中的电压电流响应特性。

1 PSCAD / EMTDC 电磁暂态仿真

PSCAD / EMTDC^[5,6]是目前世界上广泛使用的电力系统电磁暂态仿真商业软件之一。EMTDC 既可以模拟交、直流电力系统, 又能够完成电力电子仿真及非线性控制的研究。其图形界面程序 PSCAD 使用户可以在图形环境下建立仿真系统的电路图、运行仿真、管理数据、输出和分析仿真结果, 极大地方便了用户使用; EMTDC 良好的开放性使用户可以深入其程序内部, 按需要加入自定义模块甚至代码, 创造出更实用灵活的仿真环境。

1.1 EMTDC 主程序结构

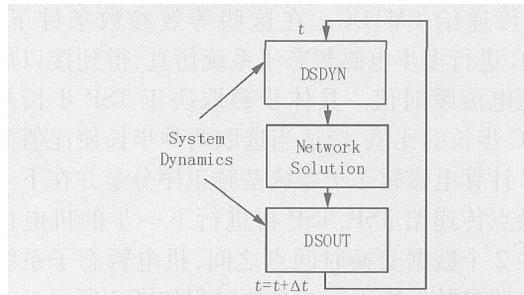


图 1 EMTDC 主程序结构图

Fig 1 Structure of EMTDC main program

如图 1 所示, EMTDC 主程序由两部分组成: 系

统动态程序段和电力网络求解模块。系统动态程序段完全由用户定义,通过它用户可以在 EMTDC 主程序中嵌入自己的程序代码,方法有 2 种:

在元件定义中直接加入 FORTRAN 代码。

在元件定义中调用外部用 FORTRAN 或 C 语言编写的子程序。

系统动态程序段包括两个子程序段:主动态子程序 (DSDYN) 和输出定义子程序 (DSOUT),这两个子程序分别位于网络求解模块的前后。一般情况下,动态控制代码应加在 DSDYN 程序段,DSOUT 主要用于输出求解后的网络变量。

2 基于 EMTDC 的混合仿真

2.1 基于 EMTDC 的混合仿真原理

根据文献 [1~4] 提出的混合仿真思想,以待进行电磁仿真的器件 (例如 FACTS) 安装母线为界,将整个仿真系统分成电磁暂态子系统 (FACTS 器件) 和机电暂态子系统。通过 EMTDC 对电磁暂态子系统进行电磁暂态仿真。利用 EMTDC 允许用户加入自己代码的功能,将 TSP 程序作为用户代码嵌入到 EMTDC 主程序中,通过调用外部 TSP 程序,对机电暂态子系统进行功角稳定仿真,在固定的时间点,两个子系统通过接口母线实现数据交换,从而实现对整个系统的混合数字仿真。

2.2 混合仿真的同步和数据交换规则

由于 TSP 和 EMTDC 的积分时间步长不同,两种仿真的数据交换只能在特定的时间点进行。由于 TSP 步长大 (毫秒级), EMTDC 的步长小 (微秒级),因此在 TSP 仿真的各时间点 (通常为 20 ms) 进行数据交换。

在每一个交换点 EMTDC 调用 TSP, TSP 进行一步机电暂态仿真,求取机电暂态子系统等效电路参数 (诺顿等效电流源幅值、相角、频率及系统等值阻抗) 并传递给 EMTDC。在这些等效参数条件下, EMTDC 进行多步电磁暂态子系统仿真,得到接口母线电压电流瞬时值。具体步数取决于 TSP 步长与 EMTDC 步长的比值,应适当选取两种步长使比值为整数。计算电磁暂态子系统基频正序分量并在下一个交换点传递给 TSP, TSP 再进行下一步的机电仿真。在 2 个数据交换时间点之间,机电暂态子系统等效电路参数保持不变。具体过程如图 2 所示。

2.3 TSP 与 EMTDC 的接口

本节以含一个 SVC 的电力系统为例说明 TSP 与 EMTDC 接口的实现方法。

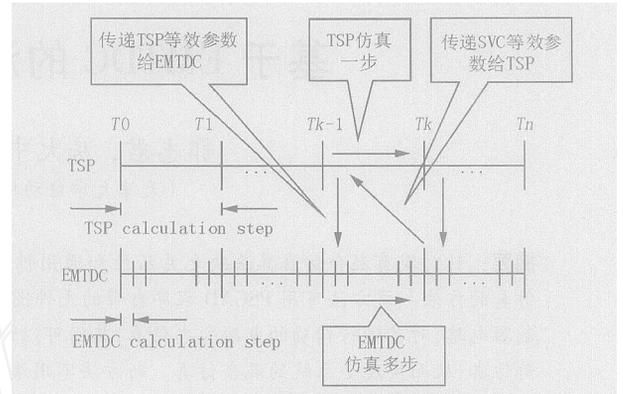


图 2 混合仿真接口规则

Fig 2 Interface protocol of hybrid simulation

2.3.1 TSP 对 EMTDC 的接口

如图 2 所示在数据交换时刻, TSP 对 EMTDC 的等效为确定的单端口诺顿电路^[7,8]。当网络中只含有一个 SVC 时, TSP 等效为单端口诺顿电路 (如图 3 所示)。当网络中有多个 SVC 或对多端口 FACTS 器件时, TSP 对 EMTDC 可类似地等效为多端口耦合诺顿电路^[9]。

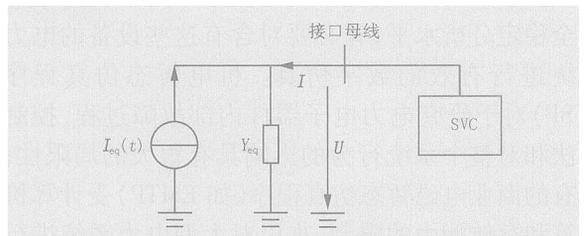


图 3 SVC 外部系统单端口诺顿等效电路

Fig 3 Single-port Norton equivalent circuit of SVC outside system

2.3.2 EMTDC 对 TSP 的接口

类似地在数据交换时刻, 电磁暂态子系统 (SVC) 对外部网络的等效有多种形式, 本文将 SVC 等效为恒功率负荷, 并在每一次 EMTDC 仿真后更新此负荷值。EMTDC 仿真得到的是 SVC 接口母线处的电压、电流三相瞬时值, 由于机电暂态仿真基于基频正序单相相量模型, 所以需要处理以获得机电暂态仿真需要的基频正序单相分量。常用傅里叶变换或最小二乘曲线拟合的方法求取 SVC 母线基频电压和注入网络的基频电流。本文采用最小二乘曲线拟合法求取 SVC 的等效负荷。设求得正序单相电压、电流的幅值和相角分别为 U 、 I 、 ϕ_u 、 ϕ_i , 则 SVC 的等效注入功率 P_{eq} 、 Q_{eq} 可由式 (1) 和 (2) 求出。

$$P_{eq} = \frac{3UI}{2} \cos(\phi_u - \phi_i) \quad (1)$$

$$Q_{eq} = \frac{3UI}{2} \sin(\phi_u - \phi_i) \quad (2)$$

2.4 混合仿真程序流程图

综上所述,根据混合仿真的基本原理及数据交换规则,得出基于 EM TDC的混合仿真程序流程图如图 4所示。

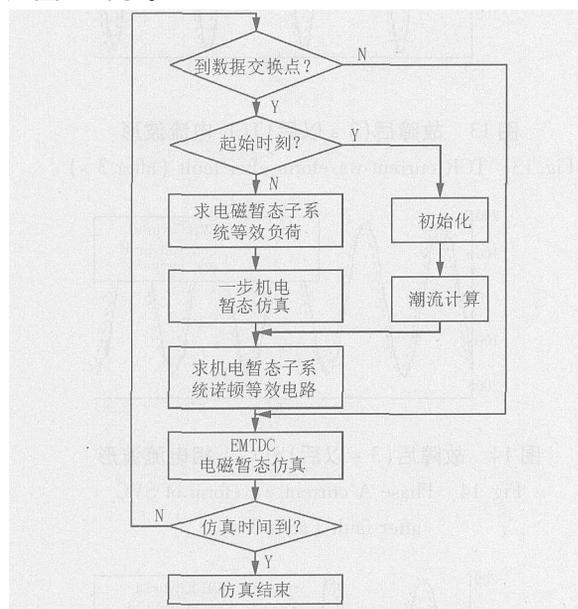


图 4 混合仿真程序流程图

Fig 4 Flow chart of hybrid simulation program

需要说明的是:在仿真初始时刻先要进行一次潮流计算以获得 TSP子系统等效电路的参数初始值,提供给 EM TDC仿真系统。

3 算例分析

为验证新算法的正确性,本文方法在含 SVC的 IEEE 3机 9节点电力系统(如图 5所示)上进行了仿真验证,其结果与全网采用 DCG版 EMTTP软件及传统混合仿真算法^[8]的仿真结果进行比较。文献[8]将晶闸管阀看成由触发脉冲控制的理想开关实现混合仿真,而本文方法晶闸管阀由 EM TDC处理。仿真中发电机采用双轴次暂态模型,负荷采用恒阻抗模型。SVC为固定电容器-晶闸管控制的电抗器(FC-TCR)型,其电磁暂态仿真模型如图 6所示,控制器参数为: $K_R = 20$, $T_R = 0.4$ s。仿真从稳态开始,扰动情况为 7号母线在 0.5 s发生三相短路故障,故障在 0.8 s切除。仿真结果示于图 7~16。

新仿真方法在短路前、中、后全过程的仿真波形与全网 EMTTP仿真结果基本一致(图 7~9)。传统混合仿真在故障前、后的电流波形都有较大偏差(图 10~12),在故障后较长时间,电压、电流的相位都产生了较大偏移(图 13~15);而本文的仿真方法

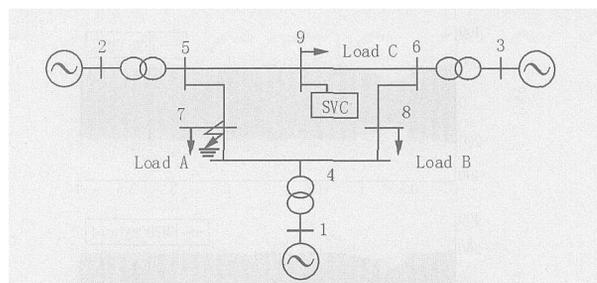


图 5 含 SVC 3机 9节点系统

Fig 5 Three-generator nine-bus system with a SVC

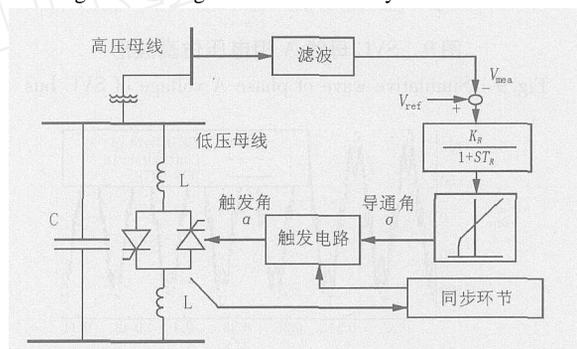


图 6 FC-TCR 型 SVC的基本构成

Fig 6 Basic configuration of FC-TCR typed SVC

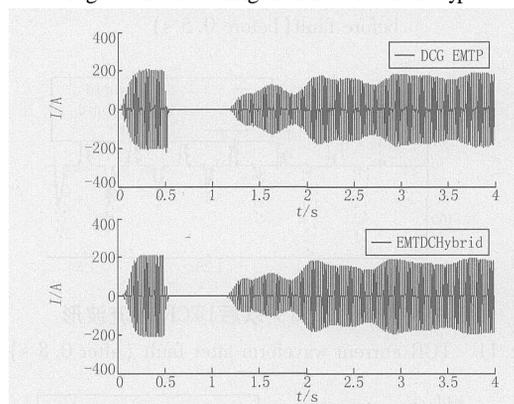


图 7 TCR 电流仿真波形

Fig 7 Simulative wave of TCR current

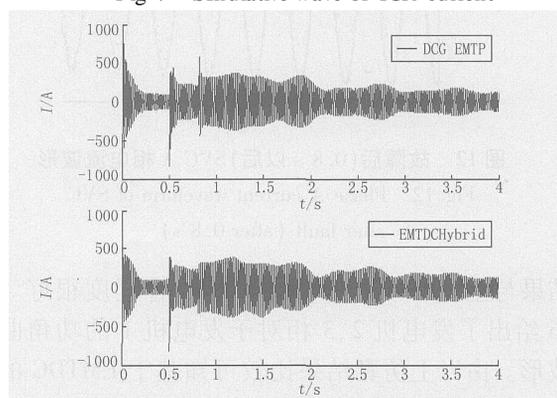


图 8 SVC A相电流仿真波形

Fig 8 Simulative wave of SVC phase A current

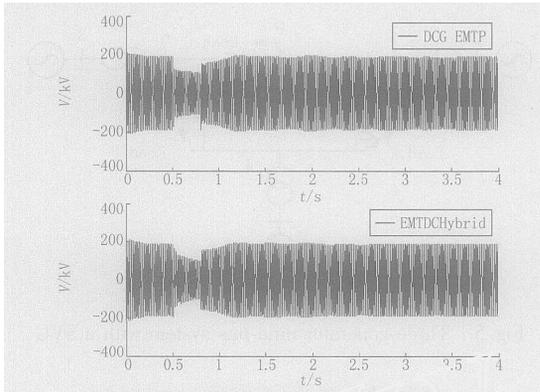


图 9 SVC母线 A相电压仿真波形

Fig 9 Simulative wave of phase A voltage of SVC bus

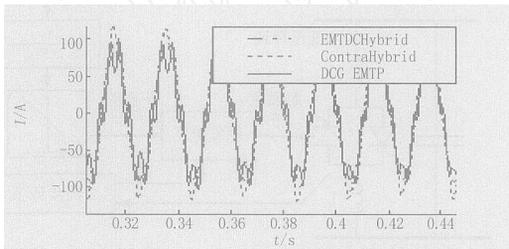


图 10故障前 (0.5 s 以前) SVC A 相电流波形

Fig 10 Phase A current waveform of SVC before fault (before 0.5 s)

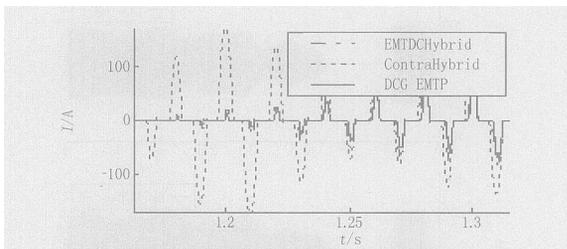


图 11 故障后 (0.8 s 以后) TCR 电流波形

Fig 11 TCR current waveform after fault (after 0.8 s)

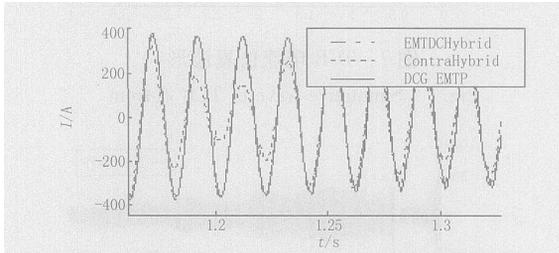


图 12 故障后 (0.8 s 以后) SVC A 相电流波形

Fig 12 Phase A current waveform of SVC after fault (after 0.8 s)

结果与全网 EMTF 仿真结果的吻合程度很好。图 16 给出了发电机 2、3 相对于发电机 1 的功角曲线波形。由以上仿真结果比较可知基于 EMTDC 的混合仿真算法能精确地模拟 SVC 在系统扰动后的动态特性,并且在机电暂态仿真方面也具有较好的效果。

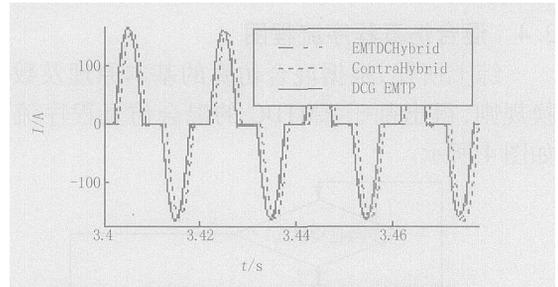


图 13 故障后 (3 s 以后) TCR 电流波形

Fig 13 TCR current waveform after fault (after 3 s)

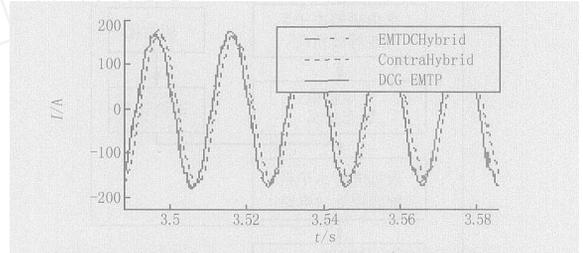


图 14 故障后 (3 s 以后) SVC A 相电流波形

Fig 14 Phase A current waveform of SVC after fault (after 3 s)

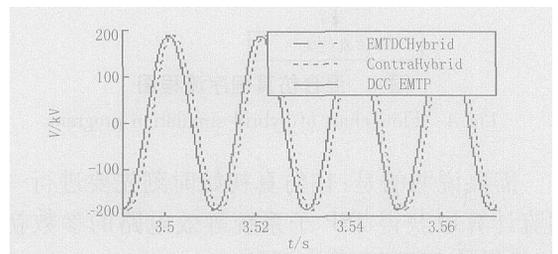


图 15 故障后 (3 s 以后) SVC 母线 A 相电压波形

Fig 15 Phase A voltage of SVC bus after fault (after 3 s)

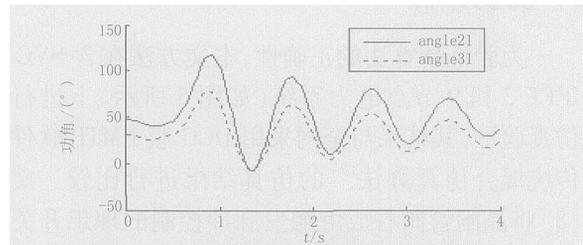


图 16 3机 9 节点系统发电机功角曲线

Fig 16 Curves of generator rotor angles in three-generator nine-bus system

4 结论

本文介绍了利用商业电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 实现混合仿真算法的方法。该方法将 TSP 程序嵌入 EMTDC 中进行混合仿真方法。本文以含 SVC 的 IEEE 3 机 9 节点系统为例,通过混合仿真和全网 EMTF 仿真结果的比较,说明了利用商业软件 PSCAD/EMTDC 实现的混合仿真算法的可行性。比较结果表明本文混合仿真算法具有很高

的精度。本文提出的混合仿真技术可扩展应用于含 HVDC和其它 FACTS器件的电力系统混合仿真。

致谢:

感谢香港理工大学赠送 DCG版 EMTTP仿真软件,使该项目研究得以开展,对此深表谢意。

参考文献:

- [1] Heffeman M D, Tumer K S, Arrillaga J, et al Computation of AC-DC System Disturbance, Part I, II and III [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100, (11): 4341-4348
- [2] Reeve J, Adapa R. A New Approach to Dynamic Analysis of AC Networks Incorporating Detailed Modeling of DC Systems, Part I Principles and Implementations [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(4): 2005-2011.
- [3] Anderson G W J, Watson N R, Arnold C P, et al A New Hybrid Algorithm for Analysis of HVDC and FACTS Systems [A]. Proceedings of the International Conference on Energy Management and Power Delivery, 1995, 2: 462-467.
- [4] Sultan M, Reeve J, Adapa R. Combined Transient and Dynamic Analysis of HVDC and FACTS Systems [J]. IEEE Trans on PD, 1998, 13(4): 1271-1277.
- [5] Woodford D A. PSCAD User's Guide [M]. Manitoba HVDC Research Centre, 2003
- [6] Woodford D A. EMTDC User's Guide [M]. Manitoba HVDC Research Centre, 2003.
- [7] SU Hong-tian, CHAN K K W, Snider L A. Interfacing

an Electromagnetic SVC Model into the Transient Stability Simulation [A]. Proceedings of the International Conference on Power, 2002, 3: 1568-1572

- [8] 王立伟,房大中,钟德成.含静止无功补偿器的电力系统混合仿真新算法研究 [J]. 电力系统自动化学报, 2004, 16(1): 74-77.
WANG Liwei, FANG Da-zhong, ZHONG De-cheng A New Hybrid Simulation Algorithm for Power System with Static var Compensator [J]. Proceedings of the CSU-EP-SA, 2004, 16(1): 74-77.
- [9] 张伯明,陈寿孙.高等电力网络分析 [M].北京:清华大学出版社, 1996
ZHANG Bo-ming, CHEN Shou-sun Higher Power Network Analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996
- [10] 黄家裕,陈礼义,孙德昌.电力系统数字仿真 [M].北京:中国电力出版社, 1995.
HUANG Jia-yu, CHEN Li-yi, SUN De-chang Digital Simulation of Power System [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.

收稿日期: 2004-07-30; 修回日期: 2004-08-11

作者简介:

鄂志君(1977-),男,硕士研究生,主要从事电力系统仿真和 FACTS方面的研究; E-mail: ezj1977@hotmail.com

房大中(1946-),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统分析、仿真、稳定和控制方面的研究。

Research of hybrid simulation algorithm based on EM TDC

E Zhi-jun, FANG Da-zhong, WANG Liwei, SONG Wen-nan
(Automation College, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To the problem of current hybrid simulation algorithm lacking feasibility and commonality, a new hybrid simulation approach using commercial software PSCAD /EM TDC is presented in this paper. Using the elements of the PSCAD master library, the new hybrid simulation approach can construct the simulation model of FACTS and its controller to carry out precise electromagnetic transient simulation, and call the inserted TSP to simulate the outside AC power system and realizes the whole system's hybrid simulation in the following. The new approach greatly simplifies the simulation process by constructing simulation project under graphical user interface, and has improved the reliability of hybrid simulation.

Key words: transient stability simulation; hybrid simulation; PSCAD /EM TDC; FACTS

(上接第 40 页 continued from page 40)

- (1. College of Electrical & Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
- 2 National University of Defense and Technology, Changsha 410112, China;
- 3 Miluo Electric Power Bureau, Miluo 414400, China)

Abstract: Based on the property of wavelet transform on stressing local characteristics, the relationship between the modulus maximum of multi-scale wavelet transforms and the sudden-change points of a signal is studied, and the detection and the location of voltage sags and periodic impulses, which are the typical disturbance signals of power quality in power network are analyzed. The simulations show the feasibility of the approach, and the results show that wavelet transforms can more accurately detect and locate power quality disturbances.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50277010).

Key words: power quality; wavelet transform; multi-scale; detection and location