

The Study and Simulate Verification of AC and HVDC
System Electromagnetic Transient Simulation Model

交直流系统电磁暂态模型 研究及仿真验证

张民 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

交直流系统电磁暂态模型 研究及仿真实验

张民 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书以工程应用为目标,结合目前直流工程设计的实际需要,基于图论理论和电磁暂态仿真技术,研究了基于PSCAD/EMTDC的交直流系统电磁暂态仿真平台。

本书主要内容包括:基于图论理论,研究了将非可视化的机电暂态仿真模型自动构建成二维可视化的电磁暂态仿真模型的方法,简化了交流系统建模工作量并提高了建模精度;基于电磁暂态仿真工具开发了与实际直流控制保护系统功能等效的仿真平台,利用该平台搭建的直流控制保护系统模型的仿真结果与实际工程一致。

本书从仿真平台的构建理论基础到具体的实施方法及仿真效果均进行了详细论述,可作为直流输电技术领域的理论研究工作者、工程设计和运行人员、调度及系统分析人员、该领域技术管理人员的理论和实务参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

交直流系统电磁暂态模型研究及仿真实验 / 张民著

— 北京:中国水利水电出版社,2014.3

ISBN 978-7-5170-1802-5

I. ①交… II. ①张… III. ①交流输电—电磁流—暂态特性—系统模型—研究②交流输电—电磁流—暂态特性—系统仿真—验证③直流输电—电磁流—暂态特性—系统模型—研究④直流输电—电磁流—暂态特性—系统仿真—验证 IV. ①TM721

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第046571号

书 名	交直流系统电磁暂态模型研究及仿真实验
作 者	张民 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	145mm×210mm 32开本 5.625印张 151千字
版 次	2014年3月第1版 2014年3月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	28.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

直流输电具有大容量、远距离传输、损耗低的优势，可以显著地发挥能源资源优化配置的作用，获得良好的综合经济效益。在进行直流工程设计和故障分析时，交直流系统建模及电磁暂态仿真计算是研究的前提与基础，研究工具一般选取电磁暂态仿真工具 PSCAD/EMTDC、EMTP 等。作者在从事直流输电工程设计、建设和运行的实际工作中发现，目前的电磁暂态仿真工具仍存在一些局限性，主要体现在：第一，交流系统的电磁暂态建模仍需要手动搭建网络拓扑模型，不能根据已有的机电暂态数据（BPA）直接形成交流电网的电磁暂态模型，自动化建模程度低，交流系统建模工作量大，存在交流系统过度等值的情况，而交流系统的详细程度直接影响直流控制系统的特性；第二，直流控制保护系统建模时，采用电磁暂态仿真工具内置的模型库元件，与实际工程控制系统的控制模块功能存在很大差异，研究成果在定性方面具有参考价值但不能用于指导实际工程的设备选型或系统参数配置；第三，为进行复杂的交直流一次系统及直流控制系统的研究，国内曾开展过机电暂态与电磁暂态混合仿真的研究，对于机电暂态与电磁暂态混合仿真而言，由于两种仿真技术数值计

算方法及计算步长的差异，在消除混合仿真系统接口控制程序计算误差以及避免仿真误差累积及放大方面还要进一步研究。

针对上述局限性，本书以工程应用为目标，结合目前直流工程成套设计的实际需要，研究了基于 PSCAD/EMTDC 的交直流系统电磁暂态仿真平台。首先，本书首次基于图论理论，研究了根据非可视化的机电暂态仿真（BPA）模型，自动构建二维可视化的电磁暂态仿真（PSCAD/EMTDC）模型的方法并获得发明专利，简化了交流系统建模工作量并提高了建模精度。其次，为提高直流控制保护系统仿真模型的准确度，本书基于电磁暂态仿真工具 PSCAD/EMTDC，开发了与实际直流控制保护系统（MACH2）功能等效的仿真平台。该平台具有与工程应用软件（Hidraw）相同的功能模块，一致的程序执行周期和时间中断机制，利用该平台搭建的直流控制保护系统模型的仿真结果与实际工程一致。最后，本书以青藏直流输电工程为例，通过开发的电磁暂态仿真平台对青藏交流系统和直流系统分别进行建模，仿真再现了青藏直流由于藏中电网交流故障引起的青藏直流换相失败现象，提出了降低青藏直流换相失败几率的措施，仿真对比了实施措施前后的差异，采取措施后的系统实际运行情况证明了措施的正确性。

该仿真平台对于广泛开展跨区直流输电系统的电磁暂态仿真研究具有工程实际指导意义，为直流工程的设

计、建设及运行提供技术支撑。

限于作者水平，本书内容不妥之处，望读者批评指正。

作者

2014年2月

于北京

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究的意义	1
1.2 交直流系统电磁暂态仿真在国内外研究发展现状	3
1.3 主要研究工作	8
第 2 章 机电暂态向电磁暂态的模型转换平台	11
2.1 引言	11
2.2 仿真模型的数据存储格式	12
2.3 相关理论	18
2.4 模型转换平台的开发	19
2.5 算例验证	39
2.6 小结	45
第 3 章 基于 PSCAD/EMTDC 的直流控制保护系统 仿真平台	47
3.1 引言	47
3.2 构建直流控制保护系统仿真平台的必要性	48
3.3 构建直流控制保护系统仿真平台的可行性	64
3.4 直流控制保护系统仿真平台	72
3.5 直流控制保护系统仿真平台的工程应用	99
3.6 小结	116
第 4 章 基于 PSCAD/EMTDC 的交直流系统仿真平台在 工程中的应用	118
4.1 引言	118

4.2	藏中电网交流系统电磁暂态建模	119
4.3	降低青藏直流换相失败几率的仿真研究	124
4.4	CIGRE 控制系统与本仿真平台控制系统在实际工程应用中的差异及分析	151
4.5	小结	158
第 5 章	结论与展望	160
5.1	主要研究成果	160
5.2	展望	162
	参考文献	163

第 1 章 绪 论

1.1 研究的意义

直流输电具有大容量、远距离传输、损耗低的优势，可以显著地发挥能源资源优化配置的作用。发展特高压电网可推动我国电力技术创新和电工制造业的技术升级。按照国家电网公司的规划，到 2015 年建成“两纵两横”特高压网架和 7 回特高压直流工程；到 2017 年建成“三纵三横”特高压网架和 13 回特高压直流工程；到 2020 年建成“五纵五横”特高压网架和 20 回特高压直流工程。届时全国形成 4 个同步电网，连接大型能源基地和主要负荷中心，实现大规模“西电东送”、“北电南送”^[1-6]。我国的直流输电技术在 20 世纪 80 年代开始发展，代表工程是自行研制的舟山工程和具有当时世界先进水平的葛洲坝至上海±500kV 直流输电工程。天广直流输电工程 1998 年 4 月开工，2001 年 6 月双极送电；三常直流输电工程 2000 年 7 月开工，2003 年 6 月正式投运；三广直流输电工程 2002 年 4 月开工，2004 年 6 月正式投运。截止到 2013 年年底，我国已投运直流输电工程共计 21 个，世界上最高直流电压等级的±800kV 云南—广东和向家坝—上海特高压直流输电工程分别于 2010 年 6 月和 7 月投入商业运行，向家坝—上海特高压直流最大连续输送容量达到 720 万 kW。直流控制保护系统作为直流工程的“大脑”及“神经系统”，技术大多来源于引进的 ABB 和 Siemens 控制保护系统，目前经国内企业消化、吸收后，国产化率已经达到 100%。

与交流系统不同，直流系统的正常运行和保护都是靠控制保护系统来实现的，它决定直流运行点、协调整流和逆变过程，对



整个直流系统起着至关重要的作用。在直流工程的设计阶段,需要对交流系统接入条件、控制系统特性、控制系统参数、直流保护配置及定值计算、过电压与绝缘配合等方面开展专题研究,研究工具一般选取机电暂态仿真软件 BPA 和电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC^[7-17]。由于电磁暂态仿真工具 PSCAD/EMTDC 采用图形界面建模、节点不受限制并且计算容量大、具有完整的一次系统模型库、计算内核稳定高效、具有开放性并且可以通过用户自定义模型来扩展功能等特点,世界各国科研单位或电气工程师广泛使用该软件开展交直流系统的电磁暂态仿真。尤其是在进行直流控制系统动态性能以及参数优化等研究时,主要采用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC。

基于电磁暂态计算的交直流系统建模及仿真目前在我国仍然是研究的热点,它是工程设计及学术研究的前提与基础,在开展直流系统各项专题研究之前,首先要建立完整、正确并且与实际工程一致的交直流系统的数学模型,包括交直流一次系统网络模型以及直流控制系统模型^[18-30]。只有在准确模型的基础上完成的研究结论才可以用于实际工程应用。目前虽然有很多针对交流接入系统、直流控制保护系统开展的电磁暂态建模及仿真的研究,但仍存在一些局限性,主要体现在:

(1) 直流控制系统建模时,控制模块采用仿真工具的内置模型库元件,与工程实际控制系统的控制模块功能存在差异,研究成果在定性方面具有参考价值但不能用于指导实际工程的控制参数设置。

(2) 在进行直流系统研究时,交流接入系统的模型详细程度不够,往往等值成一台具有系统等值阻抗的电源,而交流系统的详细程度直接影响直流控制系统的特性。我国交流系统电网数据大都适用于 BPA 环境,该数据文件在电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 中是无法使用的,交流系统建模时,通常的做法是根据机电暂态 BPA 数据文件的网络拓扑结构及元件参数在电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 中手动重新建模;但这样不仅浪



费时间，且存在元件参数的数据对应问题，在网络节点、支路及元件数目比较多时由于人为原因会出现一些错误。

(3) 为进行复杂的交直流一次系统及直流控制系统的研究，国内曾开展过机电暂态与电磁暂态混合仿真的研究，机电暂态仿真完成系统中发电机和电动机电磁转矩的仿真计算，电磁暂态仿真完成强非线性特征系统的柔性输电系统或直流输电等 FACTS 元件的仿真计算，机电暂态与电磁暂态之间的数据交互通过接口控制系统实现^[31-39]，该方式的目的是在一定程度上提高仿真速度、弱化电磁暂态仿真规模限制，但是，对于机电与电磁暂态的混合仿真而言，两种仿真技术在数值计算方法、模型结构以及计算步长上存在差异，如何消除仿真接口控制程序的计算误差，如何避免仿真误差的累积及放大的问题始终没有给出明确的解释。因此，在全电磁暂态仿真环境下进行交直流系统的电磁暂态仿真时不存在接口问题和算法差异，仿真结果更为准确。

1.2 交直流系统电磁暂态仿真在国内外研究发展现状

1.2.1 国内外电磁暂态仿真工具及仿真准确度研究概述

电磁暂态仿真是对电力系统的电磁暂态过程进行仿真模拟，采用数值计算方法的暂态过程时间在数微秒至数秒之间。电磁暂态仿真必须考虑输电线路分布参数特性和参数的频率特性、发电机的电磁和机电暂态过程以及一系列元件的非线性特性，因此，电磁暂态仿真的数学模型必须建立这些电气元件和系统的代数方程或微分、偏微分方程，数值计算一般采用隐式积分法^[40-50]。

电磁暂态仿真目前普遍采用的程序有加拿大 Manitoba 直流研究中心的 PSCAD/EMTDC、EMTP、中国电力科学研究所的 EMTPE、德国西门子公司的 NETOMAC、加拿大哥伦比亚大学的 MicroTran 等。PSCAD/EMTDC 与 EMTP 功能相似，但前者具有更好的人机界面^[51-52]，上述软件均为非实时电磁暂态离线仿真工具。文献 [53] 根据 CIGRE Benchmark 直流输电模型在 NETOMAC 数值仿真软件中建模，比较了简化模型与详细模



型的仿真精度差异。文献 [54] 利用 ATP 电磁暂态仿真工具对交直流系统过电压进行计算, 指导避雷器选型及安装位置选择。文献 [55] 利用 PSS/E 对多直流受端的上海电网 N-1 方式下的暂态稳定性进行了研究。文献 [56] 针对 PSCAD/EMTDC、EMTP 和 ATP 三种电磁暂态仿真工具的功能进行了比较, 并利用 EMTP 对魁北克水电站至新英格兰多端直流系统进行研究, 提出了实际工程控制系统软件在进行电磁暂态仿真时需要进行简化的概念。

20 世纪 90 年代初, 加拿大 Manitoba 直流研究中心 RTDS 公司推出国际上第一台电力系统全数字实时仿真系统 RTDS, 文献 [57] 介绍了采用 Dommel 算法的 RTDS 实时仿真器进行交流、直流系统、SVC 等电力系统仿真, 进行保护装置闭环测试等应用。文献 [58] 利用实时数字仿真器 RTDS 实现了直流输电及控制系统仿真的全数字化并替代了模拟直流系统仿真器。其后, 法国电力公司、加拿大魁北克水电研究所 TEQSIM 公司也开始了全数字实时仿真系统的开发与研制。文献 [59] 研究了基于西门子 SIMADYN D 平台的直流控制保护系统电磁暂态仿真建模, 并在实时仿真软件 RTDS 中构建直流控制保护模型进行仿真研究。

随着电力系统的发展以及电力系统大量 FACTs 及电力电子装置、直流输电系统、继电保护装置及安稳装置的广泛应用, 对电力系统仿真技术也提出了许多新要求, 研究了许多新的仿真方法, 主要有电磁暂态与机电暂态混合仿真, 电磁暂态并行计算, 全过程动态仿真等。文献 [60] 论证了交直流混合仿真的可行性, 交流系统采用 TSP 进行计算, HVDC 和 FACTs 模型在 EMTP 中进行计算, 文中并未对直流控制系统的模型结构进行描述。文献 [61] 提出基于电网结构的二维拓扑并行模型和常微分方程组的并行预测-校正算法, 并在四 CPU 并行机系统中验证了机-网并行暂态仿真算法。文献 [62] 提出了一种非线性差分方程形式的负荷模型与电力系统仿真计算程序 BPA 接口方法,



利用二次辨识理论解决非线性差分方程与电力系统仿真程序接口问题。

电力系统动态仿真是依赖于计算机技术的发展而出现的，国外在 20 世纪六七十年代开始电力系统动态仿真研究，国内直到 20 世纪七八十年代才开始。动态仿真结果的准确程度主要取决于两个方面：一是仿真模型及参数的准确程度；二是仿真结果与真实系统的偏差。仿真模型经过几十年的理论推导并与实际装置进行对照，模型本身已经较为精确，模型参数需要通过实测来获取才是较为准确的。对于动态仿真而言，为提高仿真结果的准确程度，需要将仿真结果与真实系统通过比较证明仿真的准确性。

文献 [63] 提出仿真准确度是衡量电力系统动态仿真模型及结果的考核标准，系统实时测量数据是验证仿真模型参数及结果可信度的标尺。文献 [64] 对电力系统动态过程对控制器参数的灵敏度要求着重分析了励磁系统参数对系统动态过程的影响。文献 [65] 分析了模型的建模理论、参数的来源及后验仿真对模型有效性的影响，提出了基于这三方面因素的模型有效性评估方法，并分析了模型有效性进行动态评估的重要性。文献 [66] 提出采用一种定量的不确定性分析方法——随机响应面法对仿真结果进行动态一致性检验的新观点，并提出了相应的检验标准。文献 [67] 结合规范系数法与距离法提出了一种定量判断元件模型仿真准确度的方法，并据此进行实际电网一次暂时性短路故障后不同模型仿真结果数据相似度与趋势相识度分析。文献 [68] 分析了电力系统的动态变量基本特征，以动态变量的特征信息衡量可用动态变量的差异，采取分时段研究的方法，对不同时段分别提出仿真误差量化评价指标，对提高动态仿真的准确度具有一定的指导意义。文献 [69] 提出精确仿真的概念，重点强调以广域测量系统实测数据作为修正模型和参数的依据，把电力系统动态仿真建立在真正定量的基础上。文献 [70] 在重现 1996 年 WECC 大停电事故的仿真分析过程中，在利用原动态数据库仿真不能重现事故的情况下，修改模型和参数，并将送端负荷模型



由恒电流改为感应电动机并联静态负荷模型的综合负荷模型后,才得到与实测一致的仿真结果。文献 [71] 利用概率分配法定量分析动态负荷所占比例的不确定性对动态仿真及稳定的影响裕度,对暂态分析时故障点模型准确度对仿真结果的影响提出评估依据。文献 [72] 提出物理验证对系统稳定研究的必要性,从稳定判据的取得、元件模型的建立以及仿真和建模的原则三个方面论证了现场观测在稳定问题研究中的重要作用,建立广域测量系统是提高动态电力系统研究水平的有效途径。

1.2.2 国内外基于 PSCAD/EMTDC 的电磁暂态仿真研究

EMTDC (Electro Magnetic Transient in DC System) 是目前世界上被广泛使用的电力系统电磁暂态仿真分析软件,多年来,Manitoba 直流研究中心不断完善 EMTDC 的元件模型库和功能,使之发展为可以完成交直流电力系统和电力电子仿真及非线性控制仿真研究的多功能工具。后期开发的 PSCAD 建模图形界面,使用户可以更方便地使用 EMTDC 进行交直流系统建模和仿真计算。

PSCAD/EMTDC 提供的元件模型库几乎涵盖了电力系统输配变电的所有元件,并包含有大量测量、控制用模型元件,既可以对交流系统,也可以对直流输电、FACTS 等柔性输电系统进行电磁暂态仿真。非但如此,PSCAD/EMTDC 还提供了灵活的接口,既可以与 Matlab 数学模型软件包接口,也可以通过 fortran 与 C 语言构建独特的模型元件并植入程序代码实现特殊仿真分析。文献 [73] 对 PSCAD/EMTDC 与 Matlab 的接口进行了研究,分析配网单相短路验证自定义模型故障选线功能。

文献 [74] 采用 EMTDC 分析了典型低压限流环节 (VD-COL) 的参数变化对直流系统受扰后直流电压和功率恢复的情况及影响。文献 [75] 利用数字仿真工具 BPA 分析了龙政双极闭锁事故后华东电网的频率响应特性,但由于仿真中负荷模型、调速器模型、发电机模型以及直流控制保护系统模型等与实际系统的差异较大,仿真结果与故障录波及频率记录结果相比有很大



差异,限制了仿真结果的精确性。文献 [76] 在 PSCAD/EMT-DC 中搭建了 IEEE9 接点模型,并对 IEEE9 接点系统的 BPA 与 EMTDC 稳态与暂态仿真结果进行了比较。文献 [77] 比较了 BPA 与 EMTDC 中发电机(含励磁系统)模型中的参数差异。文献 [78] 利用 PSCAD/EMTDC 对 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流系统的双极保护进行研究,描述了双极中性线差动保护模型及保护原理。文献 [79] 利用 PSCAD/EMTDC 进行交直流系统建模,论证了 PSCAD/EMTDC 进行交直流系统动态仿真的可行性,但该文对各个直流控制系统元件的工作机理及与实际工程控制系统软件的差异缺乏论证,因此直流系统的动态响应特性及其与实际系统的差异缺乏验证。文献 [80] 通过澳大利亚等值网对直流系统多参数阻尼控制器开展了抑制功率振荡的研究。文献 [81] 以韩国 $\pm 180\text{kV}$ 、 300MW 的直流系统为研究对象,以 PSCAD/EMTDC 为仿真工具进行系统的动态性能研究并验证了直流控制系统的特性,文中交流系统采用无穷大电源带等值阻抗模型,交流系统精确程度不够。文献 [82] 以连接马来西亚和泰国的 TNB/EGAT 直流系统为研究对象,以 PSCAD/EMTDC 为仿真工具,对直流极控功能的功率升降及频率控制进行研究。文献 [83] 利用 EMTDC 对包含多条直流的中国南方电网进行建模,研究交直流系统的相互影响及其对保护设备的影响。文献 [84] 利用 EMTDC 对 FACTS 元件进行建模,研究了 FACTS 设备及其控制系统及对韩国电网的影响。文献 [85] 以广东电网 4 条直流和 500kV 主网架为背景,利用 EMTDC 仿真平台针对仿真规模、模型选取及等值等方面进行分析。文献 [86] 基于南瑞继保公司实时仿真平台,对黑河背靠背直流控制保护功能进行了仿真,对换相失败保护进行了仿真分析。文献 [87] 利用电磁暂态仿真评估电容换相换流器应用于青藏直流工程的可行性,定性比较了电容换相换流器与常规直流的优劣。文献 [88] 基于 CIGRE 背靠背直流控制系统模型进行了逆变侧交流系统故障仿真分析。文献 [89] 基于 Hidraw 程序建立 EMTDC 仿真模型,并



在 CIGRE HVDC 标准模型的基础上进行了仿真测试。文献 [90] 以 CIGRE HVDC 标准模型为基础, 细化极控制系统功能后在 EMTDC 中进行仿真分析, 但缺乏实际软件功能对比。文献 [91] 针对多端直流交流系统故障时换相失败情况进行了分析。文献 [92] 进行了交直流系统中直流非线性设备引起的次同步振荡研究。文献 [93] 提出了直流系统参数优化的新算法, 可以有效减少仿真次数并获取理想的控制系统调节器参数, 采用 PSCAD/EMTDC 进行了验证。文献 [94] 介绍了利用 EMTDC 进行直流控制系统建模的过程, 并进行了直流换相失败的研究。文献 [95] 根据直流控制保护系统软硬件结构, 在 PSCAD 中进行离线仿真, 并对交流单相接地故障进行了仿真测试。文献 [96] 根据交直流线路同线路走廊架设时交流线路对直流线路的基波耦合现场测试数据, 在 EMTDC 中进行仿真验证并重现交流线路对同廊架设直流线路的基波影响。文献 [97] 在 PSCAD/EMTDC 中构造自定义模型, 并进行直流控制系统仿真。文献 [98] 基于 ABB 直流控制保护 MACH2 系统软件, 提出等价实时离线仿真的实现方法, 并进行了仿真测试, 但该文未进行实际系统的等效仿真验证。文献 [99] 基于时域仿真对直流系统谐振频率特性进行研究, 分析了交流系统短路阻抗、交流滤波器容量及形式等设备对直流谐振频率的影响。文献 [100] 对电流调节器传递函数进行研究, 根据直流控制系统电流调节器的参数优化情况, 提出选取不同调节器参数对阶跃响应的影响。文献 [101] 利用 PSCAD/EMTDC 对特高压直流单 12 脉动阀组投退策略及其对交流系统的影响进行了研究, 提出了单阀组投退时减小送受端交流系统无功冲击的措施。

1.3 主要研究工作

本书以工程应用为目标, 结合目前直流工程成套设计中交直流系统接入研究、直流控制系统动态性能研究等方面的实际需要, 以电磁暂态仿真工具 PSCAD/EMTDC 为基础, 进行了交流



和直流控制保护系统的电磁暂态模型研究及仿真验证工作。

(1) 针对目前我国大多数的调度运行、规划、设计、科研单位都具有交流系统的机电暂态仿真的 BPA 电网数据, 但该数据文件无法直接应用于电磁暂态仿真 PSCAD/EMTDC 模型的情况, 本书首次基于图论理论, 研究了根据非可视化的机电暂态仿真 (BPA) 模型, 自动构建可视化的电磁暂态仿真 (PSCAD/EMTDC) 模型的方法并获得发明专利, 开发了应用平台。包括形成二维电网网络的数值矩阵 (网络拓扑结构), 确定网络节点及元件纵、横坐标布局, 每个元件的稳态与暂态模型在机电暂态与电磁暂态仿真工具间的等效方法等内容, 并对二者的仿真结果进行了对比和分析。

(2) 针对目前广泛采用的直流输电控制保护系统电磁暂态仿真模型与实际工程的控制系统存在较大差异和功能缺失的情况, 本书基于电磁暂态仿真工具 PSCAD/EMTDC, 在其基础上进行了与实际直流控制保护系统 (MACH2 系统的 Hidraw 工程应用软件) 等效的仿真平台的开发, 包括自定义模型库的建模及库函数的编译等。该平台的模型库具有与实际直流控制保护系统应用软件功能相同、外观一致的功能模块, 满足进行实际工程直流控制保护系统建模的需要。研究了直流控制保护工程软件在工控机中的执行周期、分时及中断计算过程在 PSCAD/EMTDC 中的等效实现方法, 从而不需要为具有相同的功能但运行在不同执行周期的模块分别开发独立的仿真模型, 同一个功能模块可以在具有不同执行周期的程序页中使用, 极大地减小了模型库中模型的数量, 并提高了使用效率, 推动了直流输电控制保护系统仿真模型工程应用技术的研究。

(3) 利用该仿真平台搭建了三峡—常州直流输电工程控制保护系统电磁暂态仿真模型, 包括了实际工程具有的所有控制功能, 包括极功率控制、电压和电流角度控制 (含直流电流调节器、直流电压控制器、熄弧角控制等) 功能、触发控制以及附加控制功能等。将该仿真模型与“RTDS+实际外部控制系统”的