

IET

IET Power and Energy Series 39



国家电网公司
电力科技著作出版项目

电力系统电磁暂态仿真

Power Systems Electromagnetic Transients Simulation

Neville Watson
and Jos Arrillaga

陈贺 白宏 项祖涛 译



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

Original English Language
2003, All Rights Reserved

by The IET, Copyright



国家电网公司
电力科技著作出版项目

电力系统电磁暂态仿真

Power Systems Electromagnetic Transients Simulation

Neville Watson
and Jos Arrillaga

陈贺 白宏 项祖涛 译



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书内容丰富,主要介绍了各类电力系统电磁暂态仿真技术。全书共分十三章,分别为电磁暂态的定义、目的和背景,连续与离散系统分析,状态变量分析,数值积分代换,根匹配法,传输线和电缆,变压器和旋转电机,控制和保护,电力电子系统,频率相关网络等效,稳态应用,混合时间框架仿真和实时暂态仿真。作为技术类著作,本书对系统模型、分析方法和仿真实践皆有所述,内容严谨,难度适中,便于理解。

本书适合电力企业、科研单位、高校等人员使用,也可作为工程技术参考、大学教材或自学参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统电磁暂态仿真/(新西兰)沃森(Watson, N.),
(新西兰)阿里拉加(Arrillaga, J.)编;陈贺,白宏,项祖
涛译. —北京:中国电力出版社,2017.1

书名原文:Power Systems Electromagnetic Transients Sim-
ulation

ISBN 978-7-5123-8907-6

I. ①电… II. ①沃… ②阿… ③陈… ④白… ⑤项… III. ①电
力系统-暂态仿真 IV. ①TM711

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 026692 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2017年1月第一版 2017年1月北京第一次印刷

700毫米×1000毫米 16开本 24.25印张 477千字

印数 0001—2000册 定价 88.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



译者序

我国电力系统的发展方兴未艾，交直流电网混合互联、能源互联网的格局正在逐步形成，大规模风能、太阳能等再生能源需要并网消纳，智能电网和分布式独立电力系统的应用正在得到广泛关注。从宏观到微观，我国电力系统领域正在发生着深刻的变化，电力系统的电磁暂态特性也将变得日趋复杂。通过对电力系统相关元件进行准确的建模和详细、快速的电磁暂态仿真分析，可以准确地掌握电力系统的动态特征，为电力系统的规划设计、建设发展和运行实践提供重要的帮助。目前，该领域使用较多的是各类仿真软件的使用手册或技术说明书，全面系统地介绍电力系统电磁暂态仿真方面的专著尚不多见，因此通过翻译引进英国工程技术学会（IET）的专著《电力系统电磁暂态仿真》（《Power Systems Electromagnetic Transients Simulation》），满足我国电力系统发展在该领域的迫切需要。

本书涵盖了电力系统电磁暂态仿真的主要方面。第1章首先对电磁暂态的定义、目标和背景（历史沿革）做了简要介绍；第2章利用微分方程进行了连续系统分析、利用差分方程进行离散系统分析；在第3章状态变量分析部分，着重给出了状态变量的选择、状态方程的形成和求解过程，以及状态空间暂态仿真算法；第4章详细介绍了该领域的重要先行者 H. W. Dommel 教授的经典电磁暂态分析基础内容，即数值积分代换方法；第5章针对基于截断泰勒级数的积分方法在仿真阶跃响应时可能产生数值振荡问题，提出了采用差分方程指数形式的根匹配方法；第6章和第7章分别给出适用于电磁暂态仿真的传输线和电缆模型、变压器和旋转电机模型；第8章和第9章分别对控制和保护、电力电子设备的仿真实现进行了较详细的论述；第10章在更宽的频率范围内研究系统的频率响应和模型参数拟合等问题；第11章的稳态应用涉及电能质量方面的一些问题，如谐波评估、电压暂降、电压波动（闪变）等；第12章重点研究不同时间框架下，电磁暂态、机电暂态混合仿真问题；第13章对实时暂态

仿真进行了论述。作为技术类著作，该书对系统模型、分析方法和仿真实践皆有涉及，内容丰富，论述充分，既有简要说明，也有深入推导，总体难度适中。此外，本书还提供了部分算例的 Matlab 和 Fortran 仿真源代码，便于读者对书中相关内容的理解以及进一步的研究。

该著作适合电力企业、科研单位、高校等使用，作为工程技术参考、大学教材或自学资料。

由于水平有限，翻译中的不准确之处，敬请读者批评指正。

本译著得到国家电网公司电力科技著作出版基金资助和中国南方电网有限责任公司系统运行部（总调）的大力支持，特此感谢！



传统上，电路理论和电气工程的核心课程对电磁暂态分析都有所讲述，它也是许多教科书的主要内容。但是，一些电气元件的具体特性，例如电机的非线性和传输线的频率相关特性等，并没有充分地被传统电路理论所涵盖。过去，在这一领域付出了努力和贡献的专著主要有 H. A. Peterson 的《电力系统暂态行为》(1951) 和 A. Greenwood 的《电力系统电气暂态》(1971)。前者阐述了利用暂态网络分析仪来研究线性和非线性电力网络的动态行为；后者描述了电气暂态相关的基本概念，并提供了许多基于拉普拉斯变换的暂态仿真算例。

到了 20 世纪 60 年代中期，数字计算机开始决定电力系统暂态仿真的未来发展模式。1976 年，基于一些工程师和数学家们在英国做出的计算机仿真方面的开拓性工作，IEE 出版了一部名为《电力系统暂态计算》的重要专著。

但是，真正为电力系统电磁暂态计算机仿真建立永久性基础框架的是 H. W. Dommel 博士所撰写的 IEEE 经典论文《单相和多相网络中电磁暂态的数字计算机求解》(1969)。基于 Dommel 算法（通常被称为 EMTP 方法）的电磁暂态程序，现在已经成为设计电力设备和电力系统的一个必备工具。并且，它被逐步引入到电气工程专业的课程体系当中，在技术研究和程序开发中也扮演着越来越重要的角色。

EMTP 方法的应用研究经常见于 IEE、IEEE 和其他组织的国际学术期刊，以及许多国际会议的论文集中。一些国际会议特别专注于这一主题，例如电力系统暂态国际会议 (IPST) 和数字电力系统仿真器国际会议 (ICDS)。1997 年，IEEE 出版了一卷名为《电力系统暂态的计算机分析》的论文集，它较全面地选录了那些对该领域做出重要贡献的论文。随后，IEEE 又于 1998 年出版了专刊 PT-133-0《利用数字程序的系统暂态建模与分析》，它收录了 IEEE 各个任务组所发布的相关指导原则。

目前，尽管已经有许多很好的成文手册，用来向使用者介绍现有的各类电磁暂态仿真软件包，但是仍然需要一本含有综合技术信息的图书来帮助在校学生和专业工程师们更好地理解电力系统电磁暂态仿真技术，并且更容易地成为EMTP程序的有效使用者。希望本书在这些方面能够对使用者有所裨益。

尽管作者假定读者们已经掌握了电力系统分析、矩阵分析和数值计算等一些基础理论，但本书依然给出了许多参考文献，以帮助读者弥补相关领域知识的不足。

在筹备此书的过程中，该领域的许多专家学者都给予了作者很大的帮助，对此深表感谢！作者想特别指出，1983年Hermann Dommel本人在新西兰坎特伯雷大学研究期间，对作者的早期工作进行了直接指导。感谢马尼托巴高压直流输电研究中心，特别是前任主管Dennis Woodford和Garth Irwin（他们现在为Electranix公司工作）所提供的持续帮助；感谢马尼托巴大学Ani Gole给予的帮助和为本书所提供的一些重要素材；感谢K. Strunz所提供的研究论文；感谢早期在曼彻斯特理工大学，后来在坎特伯雷大学，那些与作者一道工作并为本书做出贡献的同事们，例如J. G. Campos Barros, H. Al Kashali, Chris Arnold, Pat Bodger, M. D. Heffernan, K. S. Turner, Mohammed Zavahir, Wade Enright, Glenn Anderson和Y.-P. Wang。最后，J. Arrillaga^①感谢新西兰皇家学会在本书筹备过程中，以James Cook高级研究奖学金形式给予的资助。

① 译者注：本书第二作者。

缩写和常数

缩写

APSCOM	电力系统控制、运行与管理中的进展
ATP	暂态替代程序
BPA	邦尼韦尔电管局（美国）
CIGRE	国际大电网会议
DCG	发展协调组织
EMT	电磁暂态
EMTP	电磁暂态程序
EMTDC ^①	直流电磁暂态程序
EPRI	电力科学研究院（美国）
FACTS	灵活交流输电系统
ICDS	数字电力系统仿真器国际会议
ICHQP	谐波与电能质量国际会议
IEE	电气工程师协会
IEC	国际电工委员会
IEEE	电气与电子工程师协会
IREQ ^②	魁北克水电局研究所网络仿真实验室
NIS	数值积分替代
MMF	磁动势
PES	电力工程协会
PSCAD ^③	电力系统计算机辅助设计
RTDS ^④	实时数字仿真器

① EMTDC 是马尼托巴水电局的注册商标。

② IREQ 通常是魁北克水电局研究所的简称，本书中特指其网络仿真实验室。

③ PSCAD 是马尼托巴高压直流研究中心的注册商标。

④ RTDS 是马尼托巴高压直流研究中心的注册商标。

SSTS	固态转换开关
TACS	控制系统暂态分析
TCS	暂态变换器仿真（状态变量分析程序）
TRV	暂态恢复电压
UIE	国际电热联盟

常数

ϵ_0	真空介电常数 $[8.85 \times 10^{-12} \text{C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2) \text{ 或者 } \text{F}/\text{m}]$
μ_0	真空磁导率 $[4\pi \times 10^{-7} \text{Wb} / (\text{A} \cdot \text{m}) \text{ 或者 } \text{H}/\text{m}]$
π	3.141 592 653 5
c	光速 $(2.997\ 93 \times 10^8 \text{m}/\text{s})$



目 录

译者序

前言

缩写和常数

第 1 章 定义、目的和背景	1
1.1 引言	1
1.2 电磁暂态的分类	1
1.3 暂态仿真器	3
1.4 数字仿真	4
1.4.1 状态变量分析	4
1.4.2 差分方程方法	4
1.5 历史沿革	5
1.6 应用范围	7
1.7 参考文献	8
第 2 章 连续与离散系统分析	9
2.1 引言	9
2.2 连续系统	9
2.2.1 状态变量表达式.....	10
2.2.2 状态方程的时域解.....	17
2.2.3 连续系统的数字仿真.....	19
2.3 离散系统.....	26
2.4 连续域与离散域之间的关系.....	28
2.5 小结.....	29
2.6 参考文献.....	29
第 3 章 状态变量分析	30
3.1 引言.....	30
3.2 状态变量的选择.....	30
3.3 状态方程的形成.....	32

3.3.1	变换法	32
3.3.2	图解法	34
3.4	求解过程	36
3.5	暂态变换器仿真 (TCS)	37
3.5.1	标幺系统	38
3.5.2	网络方程	38
3.5.3	TCS 的结构	41
3.5.4	换流阀开关处理	43
3.5.5	自动步长调整的效果	45
3.5.6	TCS 变换器控制	48
3.6	算例	51
3.7	小结	55
3.8	参考文献	55
第 4 章	数值积分代换	57
4.1	引言	57
4.2	R, L, C 元件的离散化	57
4.2.1	电阻	57
4.2.2	电感	58
4.2.3	电容	59
4.2.4	元件组合降阶	60
4.3	传输线双端诺顿等效模型	62
4.4	网络求解	64
4.4.1	算例: 电压源转化为电流源	65
4.4.2	含有开关的网络求解	66
4.4.3	算例: 作用到 RL 负荷的电压阶跃	68
4.5	非线性或时变参数	75
4.5.1	电流源替代法	75
4.5.2	补偿法	75
4.5.3	分段线性法	77
4.6	子系统	77
4.7	稀疏与编号优化	80
4.8	数值误差和不稳定性	81
4.9	小结	82
4.10	参考文献	82
第 5 章	根匹配法	84
5.1	引言	84

5.2	差分方程的指数形式	84
5.3	差分方程的 z 域表示	86
5.4	在 EMTP 算法中的实现	89
5.5	差分方程指数形式族	94
5.5.1	阶跃响应	96
5.5.2	稳态响应	97
5.5.3	频率响应	98
5.6	算例	100
5.7	小结	101
5.8	参考文献	102
第 6 章	传输线和电缆	103
6.1	引言	103
6.2	贝瑞隆 (Bergeron) 模型	104
6.3	频率相关传输线	108
6.3.1	频域到时域的转变	111
6.3.2	相域模型	114
6.4	架空传输线参数	115
6.4.1	分裂导线	117
6.4.2	地线	118
6.5	地下电缆	119
6.6	算例	121
6.7	小结	129
6.8	参考文献	130
第 7 章	变压器和旋转电机	132
7.1	引言	132
7.2	基本变压器模型	132
7.2.1	数值实现	134
7.2.2	参数导出	134
7.2.3	模拟非线性	136
7.3	高级变压器模型	137
7.3.1	单相 UMEC 模型	137
7.3.2	UMEC 在 PSCAD/EMTDC 中的实现	141
7.3.3	三芯柱三相 UMEC	142
7.3.4	快速暂态模型	145
7.4	同步机	146
7.4.1	电磁模型	146

7.4.2	机电模型	152
7.4.3	机网接口	154
7.4.4	可用旋转电机的类型	156
7.5	小结	157
7.6	参考文献	158
第 8 章	控制和保护	160
8.1	引言	160
8.2	控制系统暂态分析	160
8.3	PSCAD/EMTDC 中的控制模块	161
8.4	保护系统建模	170
8.4.1	互感器	170
8.4.2	机电式继电器	172
8.4.3	电子式继电器	173
8.4.4	基于微处理器的继电器	173
8.4.5	断路器	173
8.4.6	避雷器	174
8.5	小结	176
8.6	参考文献	177
第 9 章	电力电子系统	179
9.1	引言	179
9.2	EMTDC 中换流阀的表示	179
9.3	开关瞬时的配置和定位	180
9.4	尖峰和数值振荡 (振颤)	182
9.5	HVDC 变换器	189
9.6	HVDC 仿真算例	191
9.7	灵活交流输电系统设备	194
9.7.1	静止无功补偿器	195
9.7.2	静止补偿器	198
9.8	状态变量模型	201
9.8.1	EMTDC/TCS 接口实现	201
9.8.2	控制系统表示	203
9.9	小结	204
9.10	参考文献	205
第 10 章	频率相关网络等效	206
10.1	引言	206
10.2	FDNE 的位置	207

10.3	降阶系统的范围	207
10.4	频率范围	207
10.5	系统频率响应	207
10.5.1	频域识别	208
10.5.2	时域识别	214
10.6	模型参数拟合	215
10.6.1	RLC 网络	215
10.6.2	有理函数	216
10.7	模型实现	218
10.8	算例	218
10.9	小结	225
10.10	参考文献	226
第 11 章	稳态应用	227
11.1	引言	227
11.2	初始化	228
11.3	谐波评估	228
11.4	非线性设备的相位依赖阻抗	229
11.5	时域起辅助作用	230
11.5.1	时不变非线性元件的迭代求解	231
11.5.2	一般非线性元件的迭代求解	232
11.5.3	加速技术	233
11.6	时域起主要作用	234
11.6.1	基本时域算法	234
11.6.2	步长	234
11.6.3	直流系统表示	234
11.6.4	交流系统表示	235
11.7	电压暂降	236
11.8	电压波动	239
11.9	电压切痕	243
11.10	小结	245
11.11	参考文献	246
第 12 章	混合时间框架仿真	248
12.1	引言	248
12.2	混合算法描述	249
12.2.1	独立程序修改	249
12.2.2	数据流	250

12.3	TS/EMTDC 接口	251
12.3.1	等效阻抗	252
12.3.2	等效电源	253
12.3.3	相-序数据转换	254
12.3.4	接口变量推导	254
12.4	EMTDC 到 TS 的数据转换	256
12.5	交互协议	257
12.6	接口位置	258
12.7	测试系统和结果	259
12.8	讨论	261
12.9	参考文献	261
第 13 章	实时暂态仿真	263
13.1	引言	263
13.2	采用专用体系结构的仿真	264
13.2.1	硬件	265
13.2.2	RTDS 的应用	266
13.3	在标准计算机上的实时应用	268
13.4	小结	270
13.5	参考文献	271
附录 A	PSCAD/EMTDC 程序结构	272
A.1	参考文献	278
附录 B	系统识别技术	279
B.1	s 域识别 (频域)	279
B.2	z 域识别 (频域)	280
B.3	z 域识别 (时域)	282
B.4	Prony 分析	283
B.5	递归最小二乘曲线拟合算法	284
B.6	参考文献	286
附录 C	数值积分	287
C.1	经典方法回顾	287
C.2	积分公式的截断误差	290
C.3	积分方法的稳定性	291
C.4	参考文献	292
附录 D	测试系统数据	293
D.1	CIGRE 标准测试模型	293
D.2	新西兰南岛南部系统	296

D. 3	参考文献	298
附录 E	导出差分方程	299
E. 1	应用到一阶滞后函数的根匹配技术	299
E. 2	应用到一阶微分极点函数的根匹配技术	299
E. 3	通过双线变换得到 RL 串联支路的差分方程	300
E. 4	通过数值积分代换得到 RL 串联支路的差分方程	300
附录 F	MATLAB 代码示例	304
F. 1	作用到 RL 负荷的电压阶跃 1	304
F. 2	作用到 RL 负荷的电压阶跃 2	305
F. 3	F. 2 示例的一般化程序	307
F. 4	差分方程的频率响应	319
附录 G	用于状态变量分析的 FORTRAN 代码	323
附录 H	用于 EMT 仿真的 FORTRAN 代码	330
H. 1	直流电源、开关和 RL 负荷	330
H. 2	用于直流电源、开关和 RL 负荷的一般化 MET 程序	332
H. 3	交流电源、二极管和 RL 负荷	336
H. 4	状态变量分析程序 1	339
H. 5	状态变量分析程序 2	342
H. 6	状态变量分析程序 3	346
H. 7	输电线路程序的子程序	354
索引	357

图目录

图 1.1	各种暂态现象的时间范围	2
图 1.2	暂态网络分析仪	3
图 2.1	与 s 平面极点位置对应的脉冲响应	19
图 2.2	超前一滞后函数的阶跃响应	25
图 2.3	z 域中一个有理函数的诺顿等效	27
图 2.4	与 z 平面极点位置相对应的数据序列	27
图 2.5	不同域之间的关系	28
图 3.1	不易识别的独立状态变量	31
图 3.2	电容回路	32
图 3.3	无接地电容器和添加小电容构成对地连接电容器 (a) 无接地电容器; (b) 添加小电容构成对地连接	33
图 3.4	矩阵划分	35
图 3.5	行阶梯形	35
图 3.6	修改的状态变量方程	36
图 3.7	状态变量分析流程图	37
图 3.8	T 型等效电路	38
图 3.9	TCS 支路类型	39
图 3.10	TCS 计算流程图	42
图 3.11	状态变量程序中的开关变化处理	43
图 3.12	基于换流阀电流反向的时间插值 (a) 线性插值到 t_x 时刻; (b) 从 t_x 时刻开始, 以 Δt 作为步长进行计算	44
图 3.13	NETOMAC 仿真响应 (a) $50\mu\text{s}$ 步长; (b) 1ms 步长	46
图 3.14	采用 1ms 步长的 TCS 仿真	46
图 3.15	从 TCS 得到的稳态响应 (a) $50\mu\text{s}$ 步长; (b) 1ms 步长	47
图 3.16	对于 0.5s 时的直流短路, 采用 TCS 的暂态仿真 (a) 1ms 步长; (b) $50\mu\text{s}$ 步长	48
图 3.17	基于锁相振荡器的触发控制机制	49
图 3.18	触发脉冲中的同步误差	50