



国际电气工程先进技术译丛

IET

电力系统暂态与 动态过程数值分析

Numerical Analysis of Power System
Transients and Dynamics

[日] 雨谷 昭弘 (Akihiro Ametani) 等著

负志皓 译



IET

Power and Energy Series 12



Numerical Analysis
of Power System
Transients and
Dynamics

Edited by Akihiro Ametani



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际电气工程先进技术译丛

电力系统暂态与动态 过程数值分析

Numerical Analysis of Power System Transients and Dynamics

[日] 雨谷 昭弘 (Akihiro Ametani) 等著
负志皓 译

机械工业出版社

本书重点介绍了电力系统中的电磁暂态数值分析方法与工程应用。全书分为两部分。第1部分介绍了目前较为流行的几种电磁暂态仿真软件,包括 EMTF-ATP、EMTF-RV、EMTDC/PSCAD 和 XTAP 的发展历程、主要原理和用法。第2部分首先介绍了应用范围更广的两种典型数值电磁仿真方法,即时域有限差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)法与部分元等效电路(Partial Element Equivalent Circuit, PEEC)法的原理和应用,然后分别针对风电、光伏系统的雷击浪涌暂态过程、暂态过电压和绝缘配合、电压源型 FACTS 特性、电缆系统中 SVC 应用以及接地系统进行了电磁暂态数值仿真分析,并与在实际应用中的实测结果进行对比,论证了数值分析方法的正确性。

本书涵盖面广,内容详实,适合作为相关领域研究人员和现场工程人员的参考书。

Original English Language Edition published by The IET.

Copyright © 2015 The Institution of Engineering and Technology, All Rights Reserved.

This title is published in China by China Machine Press with license from the IET. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书由 the IET 授权机械工业出版社在中国境内地区(不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区)出版与发行。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2015-7593 号。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统暂态与动态过程数值分析/(日)雨谷 昭弘(Akihiro Ametani)等著;负志皓译. —北京:机械工业出版社,2018.6

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Numerical Analysis of Power System Transients and Dynamics
ISBN 978-7-111-60174-6

I. ①电… II. ①雨…②负… III. ①电力系统-暂态特性-数值分析
②电力系统-动态特性-数值分析 IV. ①TM712

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第126507号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:付承桂 责任编辑:闫洪庆

责任校对:郑 婕 封面设计:马精明

责任印制:常天培

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2018年8月第1版第1次印刷

169mm×239mm·26.75印张·544千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-60174-6

定价:99.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
电话服务 网络服务

服务咨询热线:010-88361066 机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294 机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203 金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版 教育服务网:www.cmpedu.com

译者序

在电力系统分析领域，暂态过程数值分析一直是极为重要的组成部分。但目前存在的各种电磁暂态仿真工具软件始终缺乏系统的梳理。随着可再生能源的快速发展，大量建设的风电场和光伏电站所涉及的各种电磁暂态过程数值分析也迫切需要推广普及。本书则恰好适应上述需求。原书分为两大部分，第1部分针对当前流行的几种电磁暂态仿真软件，包括 EMTP - ATP、EMTP - RV、EMTDC/PSCAD 和 XTAP，系统地介绍了其诞生的历史背景、发展历程、主要原理和基本用法，为相关领域的科研人员在工具软件选择上提供了较为全面的依据和参考。第2部分则是针对更为复杂电磁暂态过程如输电线与雷电互感耦合等，介绍了应用较为广泛的时域有限差分（Finite Difference Time Domain, FDTD）法与部分元等效电路（Partial Element Equivalent Circuit, PEEC）法的理论基础，并详细论述了两种方法在可再生能源领域如光伏电站和风电场的雷击暂态过程上的应用，基于实测结果与数值分析结果的一致性，论证了数值分析方法的有效性。同时，还涉及了保护设备中的故障定位和高速开关装置的仿真、过电压保护和绝缘配合、FACTS 设备中电压源型变换器的谐波谐振、电缆系统中 SVC 的应用，以及接地系统对输电线雷击响应的影响等相关分析。全书论述详实，内容全面，对于从事相关领域工作的科研人员有较好的借鉴作用。

在本书翻译过程中，崔馨慧、王成斌、史守圆、赵浩然、胡泰锋和邝俊威先后参与部分工作，对译稿的完成做出较大的贡献，在此深表感谢。原书中明显的笔误和印刷错误在译稿中直接修正未加说明。

由于本书覆盖面广，限于译者水平，书中难免会有疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

译者

原 书 前 言

数值分析是研究电力系统各种现象的一种标准方法。在电力系统暂态领域, 20 世纪 60 年代数字计算机的兴起开启了数值仿真之路。1973 年, A. Ametani 作为国际大电网组织工作组 (CIGRE Working Group) 13-05 的成员, 开始调研由大学和工业界开发的各種相关软件的精度和局限。经过工作组的三年调研, 所有成员一致认为, 由美国内政部 (后来的美国能源部) 的邦纳维尔电力管理局 (BPA) H. W. Dommel 教授开发的电磁暂态程序 (EMTP) 比当时世界上所有其他软件都优秀。从那时起, 世界各地的学者、工程人员和大学生开始应用 BPA-EMTP, 同时许多专家对其进行了深入开发。1980 年, EMTP 不仅是电力系统暂态分析的标准工具之一, 而且还被用来进行诸如潮流之类的稳态分析以及通用电力电子电路如 AC/DC 变换器的动态行为分析。

1984 年, 合作开发组和美国电力科学研究院 (Development Coordination Group/Electric Power Research Institute) 开始重新设计了 BPA-EMTP 整体构架, 并在 1986 年由 Hydro-Québec 完成了 EMTP-RV (restructured version) 的第 1 版。同时, 由于曼尼托巴水电公司投运了 Nelson River HVDC 输电系统, 由其 HVDC 研究中心开发了专门用于分析 HVDC 输电系统的全新 EMTP 软件, 称之为 EMTDC 和 PSCAD。另外, 自 1973 年以来一直参与 BPA-EMTP 研发的 W. Scott-Meyer 博士, 利用业余时间个人开发了 EMTP-ATP (Alternative Transients Program) 以便于公众应用。

自 20 世纪 90 年代起, 世界范围内广泛应用的 EMTP 仿真工具有三种。BPA-EMTP 最初是针对电力系统稳态及诸如开关、故障和雷电浪涌等暂态过程分析开发的。由于智能电网和 FACTS 的推广, EMTP 型分析软件需要处理更长的时间周期, 即从毫秒级到秒级甚至分钟级。为适应这一需求, 上述三种软件不断进行修改和更新, 很多电力公司还专门开发了新的仿真工具。较为典型就是 XTAP, 由日本电力公司开发。除此之外, 还出现了被称为实时仿真器的 RTDS 和 ARENE。

以上工具软件原理上都采用了电磁波传播模式为横向传播 (Transverse Electromagnetic Mode, TEM) 的电路理论假设。为了仿真横向和非横向传播模式相关的暂态现象, 例如建筑物 (水平加垂直钢架结构) 内和输电线与附近雷电互感耦合的暂态电磁场等, 数值电磁分析 (Numerical Electromagnetic Analysis, NEA) 就是一种比较有效的方法。NEC 和 VSTL 就是基于 NEA 方法较为知名的软件。

在本书的第 1 部分中, 第 1 章中介绍了基于电路理论仿真工具和 NEA 方法的基本原理。然后结合部分应用案例, 介绍了各种仿真软件工具的特性、特长和

不足。

仿真软件 EMTP-ATP、EMTP-RV、EMTDC/PSCAD 和 XTAP 分别在第 2~5 章介绍。第 6 章和第 7 章则分别阐述数值电磁分析方法中的时域有限差分 (Finite-Difference Time-Domain, FDTD) 法与部分元等效电路 (Partial Element Equivalent Circuit, PEEC) 法的原理和应用。

在本书第 2 部分中, 重点介绍了应用 NEA 方法分析研究电力系统中的暂态和动态现象。

第 8 章主要阐述应用 FDTD 方法分析可再生能源系统相关的各种元件如风电机组与塔架、接地以及光伏系统等。

第 9 章介绍了风电场和汇流系统。其系统建模应用了 EMTP-ATP、EMTDC/PSCAD、ARENE 和 NEA 方法。最后针对逆流浪涌进行了浪涌分析。

第 10 章讨论了保护设备的数值分析, 重点是故障测距和高速开关设备的仿真。本章采用的是 EMTP-ATP。

第 11 章论述了电力系统过电压和保护方法, 并研究了应用避雷器抑制过电压以及电力系统的绝缘配合。

第 12 章描述了 FACTS 中的动态现象尤其是 STATCOM, 并对电压源型变换器的谐波谐振进行了数值分析。

第 13 章阐述了电缆系统中 SVC 的应用。基于有效值分析和仿真讨论了基于 SVC 的电缆系统电压控制。

第 14 章重点了讨论接地系统。阐述了接地电极的基本概念和暂态响应。这种响应采用数值电磁模型进行仿真和分析, 并给出了一个接地电极对输电线雷击响应影响的灵敏度分析案例。

Akihiro Ametani

Doshisha 大学荣誉教授

日本京都

目 录

译者序

原书前言

第 1 章 电路理论应用方法和数值电磁分析介绍	1
1.1 基于电路理论方法的 EMTP	1
1.1.1 EMTP 原型概述	1
1.1.2 节点分析法	3
1.1.3 等效电阻电路	4
1.1.4 稀疏矩阵	6
1.1.5 频率相关线路模型	7
1.1.6 变压器	7
1.1.7 三相同步电机	8
1.1.8 通用电机	9
1.1.9 开关	10
1.1.10 避雷器和保护间隙（角形避雷器）	13
1.1.11 包含非线性元件	15
1.1.12 TACS	16
1.1.13 MODELS（EMTP - ATP 中的实现）	17
1.1.14 EMTP 中制定的电力系统元件	19
1.1.15 基本输入数据	19
1.2 数值电磁分析	30
1.2.1 引言	30
1.2.2 麦克斯韦方程	30
1.2.3 NEA 方法	31
1.2.4 时域和频域的矩量法	32
1.2.5 时域有限差分法	33
1.3 结论	34
参考文献	34
第 2 章 EMTP - ATP	38
2.1 引言	38
2.2 性能	39
2.2.1 概述	39
2.2.2 内置电气元件	40

2.2.3 嵌入式仿真模块 TACS 和 MODELS	40
2.2.4 辅助模块	41
2.2.5 频域分析	42
2.2.6 潮流选项——FIX SOURCE	42
2.2.7 典型电力系统研究	43
2.3 解决方法	43
2.3.1 开关	44
2.3.2 非线性	47
2.3.3 传输线	48
2.3.4 电机	50
2.4 控制系统	51
2.4.1 TACS	51
2.4.2 MODELS	53
2.4.3 用户自定义组件 (type - 94)	54
2.5 图形预处理器 ATPDraw	55
2.5.1 主要功能	56
2.5.2 输入对话框	58
2.5.3 线路和电缆建模——LCC 模块	58
2.5.4 变压器建模——XFMR 模块	59
2.5.5 电机建模——Windsyn 模块	60
2.5.6 MODELS 模块	61
2.6 其他仿真后处理和仿真预处理程序	62
2.6.1 查看和创建科学绘图的 PlotXY 程序	62
2.6.2 ATPDesigner——电力网络的设计和仿真	62
2.6.3 ATP Analyzer	65
2.7 算例	66
2.7.1 雷电研究——线路建模、闪络和电流波动	66
2.7.2 中性点线圈调谐——优化	70
2.7.3 电弧建模	72
2.7.4 变压器励磁涌流计算	74
2.7.5 电力系统工具箱：继电器	79
参考文献	85
第3章 EMTP - RV 电磁暂态仿真	88
3.1 引言	88
3.2 EMTP 的主要模块	88
3.3 图形用户界面	89
3.4 稳态和时域解的 EMTP 网络方程式	91
3.4.1 EMTP 中使用的修正增广节点分析	91

3.4.2 状态空间分析	96
3.5 控制系统	97
3.6 多相潮流解和初始化	99
3.6.1 潮流约束	101
3.6.2 潮流方程的初始化	102
3.6.3 稳态解的初始化	102
3.7 实现	102
3.8 EMTF 模型	103
3.9 外部编程接口	104
3.10 应用示例	104
3.10.1 开关暂态研究	105
3.10.2 IEEE-39 节点基准算例	106
3.10.3 风力发电	106
3.10.4 地磁扰动	110
3.10.5 HVDC 输电	110
3.10.6 规模非常大的系统	112
3.11 结论	114
参考文献	114

第 4 章 EMTDC/PSCAD 117

4.1 引言	117
4.2 EMTDC 的功能	119
4.3 时间步长之间的插值	120
4.4 用户建模	123
4.5 其他程序接口	123
4.5.1 与 MATLAB / Simulink 的接口	123
4.5.2 与 E-TRAN 转换器的接口	123
4.6 PSCAD 中的操作	126
4.6.1 PSCAD 中的基本操作	126
4.6.2 混合仿真	127
4.6.3 电力系统设备的准确建模	128
4.6.4 大型复杂的电力系统模型	128
4.7 PSCAD 的专业研究	129
4.7.1 全局增益裕度	129
4.7.2 多控制功能优化	129
4.7.3 次同步振荡	129
4.7.4 次同步控制交互	130
4.7.5 谐波频率扫描	131
4.8 PSCAD 的进一步开发	131

4.8.1 并行处理	131
4.8.2 大型系统研究的通信、安全和管理	132
4.9 PSCAD 在电缆暂态方面的应用	133
4.9.1 仿真设置	133
4.9.2 用于电缆常数计算的参数	136
4.9.3 电缆模型的改进	138
4.9.4 PSCAD 应用于电缆暂态的总结	141
4.10 结论	142
参考文献	143
第5章 XTAP	145
5.1 引言	145
5.2 基于 2S - DIRK 方法的数值积分	145
5.2.1 2S - DIRK 积分算法	146
5.2.2 线性电感和电容公式	147
5.2.3 与其他积分方法的分析精度比较	148
5.2.4 与其他积分方法的分析稳定性和刚性衰减比较	149
5.2.5 与其他积分方法的数值比较	151
5.3 基于鲁棒高效迭代方案的求解方法	158
5.3.1 问题描述	158
5.3.2 迭代方法	159
5.3.3 XTAP 中使用的迭代方案	163
5.3.4 数值算例	163
5.4 稳态初始化方法	171
5.5 面向对象设计的仿真代码	172
参考文献	173
第6章 采用时域有限差分法的数值电磁分析	177
6.1 引言	177
6.2 FDTD 法	177
6.2.1 基础	177
6.2.2 优点和缺点	180
6.3 雷电回击通道和激励的表示	180
6.3.1 雷电回击通道	180
6.3.2 激励	182
6.4 应用	183
6.4.1 近距离和远距离的雷电电磁场	183
6.4.2 架空输电线路和塔架上的雷电浪涌	187
6.4.3 架空配电线路上的雷电浪涌	192

6.4.4	变电站的雷电电磁环境	195
6.4.5	飞行器的雷电电磁环境	195
6.4.6	建筑物的雷电浪涌和电磁环境	195
6.4.7	接地电极浪涌	195
6.5	结论	196
	参考文献	196
第7章 采用 PEEC 法的数值电磁分析		204
7.1	混合势积分方程	206
7.2	广义 PEEC 模型	207
7.2.1	广义 PEEC 法的推导	207
7.2.2	PEEC 法的电路解释	212
7.2.3	PEEC 元的离散化	213
7.2.4	平面半空间的 PEEC 模型	213
7.3	PEEC 模型的相关近似	214
7.3.1	中心到中心的延迟近似	214
7.3.2	准静态 PEEC 模型	215
7.3.3	微元的计算	216
7.4	矩阵公式和解	218
7.4.1	频域电路方程和解	219
7.4.2	时域电路方程和解	221
7.5	PEEC 模型的稳定性	223
7.5.1	+PEEC 公式	223
7.5.2	并联阻尼电阻	224
7.6	PEEC 模型的电磁场计算	224
7.7	应用示例	226
7.7.1	输电杆塔的浪涌特性	226
7.7.2	接地系统的浪涌特性	232
	参考文献	234
第8章 可再生能源系统组件中的雷电浪涌		238
8.1	风力机中的雷电浪涌	238
8.1.1	风力机上雷电浪涌传播引起的过电压	238
8.1.2	风力机的接地特性	246
8.1.3	雷电事故及其调查示例	254
8.2	太阳能发电系统	263
8.2.1	MW 级太阳能发电系统中的雷电浪涌	264
8.2.2	雷击太阳能发电系统引起的过电压	278
	参考文献	285

第 9 章 风电场和汇流系统中的浪涌	289
9.1 引言	289
9.2 冬季雷电和逆流浪涌	290
9.3 风力机和风电场的接地系统	291
9.3.1 风力机的接地系统	291
9.3.2 风电场的接地系统	292
9.4 风电场雷电浪涌分析模型	292
9.4.1 风电场模型	292
9.4.2 冬季防雷模型	294
9.4.3 浪涌保护装置 (SPD) 型号	294
9.4.4 ARENE 和 EMTDC/PSCAD 之间的比较分析	295
9.5 逆流浪涌引发 SPD 烧毁事件的原理	296
9.5.1 风电场中浪涌传播的分析	296
9.5.2 浪涌波形的详细分析	297
9.6 架空地线防止逆流浪涌的影响	298
9.6.1 风电场中汇流线的模型	298
9.6.2 SPD 的波形观察	300
9.6.3 SPD 烧毁的概率评估	300
9.6.4 接地系统电位上升的评估	302
9.7 结论	303
符号和缩略语	304
致谢	305
参考文献	305
第 10 章 保护装置：故障测距装置和高速开关设备	307
10.1 引言	307
10.2 故障测距	307
10.2.1 故障测距算法	307
10.2.2 使用 MODELS 描述故障测距模型	308
10.2.3 故障电弧特性影响的研究	310
10.2.4 设备测量输入误差的影响研究	313
10.3 高速开关设备	318
10.3.1 建模方法	318
10.3.2 与测量结果的比较	319
10.3.3 电压跌落幅值的影响	320
10.4 结论	323
参考文献	323
第 11 章 过电压保护和绝缘配合	326
11.1 过电压分类	326

XII 电力系统暂态与动态过程数值分析

11.1.1	暂时过电压	326
11.1.2	缓波头过电压	327
11.1.3	快波头过电压	328
11.1.4	极快波头过电压	329
11.2	绝缘配合研究	329
11.2.1	研究流程	329
11.2.2	过电压类型的确定	330
11.2.3	确定过电压类型之后的研究步骤	331
11.3	避雷器的选择	332
11.3.1	持续工作电压	333
11.3.2	额定电压	333
11.3.3	额定放电电流	333
11.3.4	防护等级	334
11.3.5	能量吸收能力	334
11.3.6	额定短路电流	335
11.3.7	研究流程	335
11.4	暂态分析示例	336
11.4.1	模型设置	336
11.4.2	分析结果	342
	参考文献	346

第 12 章 FACTS：电压源型变换器 348

12.1	类别	348
12.2	控制系统和仿真建模	349
12.3	STATCOM 的应用	351
12.3.1	电压波动	352
12.3.2	小干扰稳定性	352
12.3.3	电压稳定性	354
12.3.4	暂态稳定性	356
12.3.5	抑制过电压	358
12.4	高次谐波谐振现象	359
12.4.1	高次谐波谐振现象概述	359
12.4.2	高次谐波谐振现象的原理	365
12.4.3	现场试验	366
12.4.4	注意事项和应对方法	367
	参考文献	369

第 13 章 SVC 在电缆系统中的应用 371

13.1	孤岛的交流电缆互连	371
13.2	孤岛电压变化的典型示例	372

13.3	SVC 所需的控制功能	372
13.4	SVC 的 $V-I$ 特性	373
13.5	SVC 的自动电压调节器 (AVR)	374
13.6	暂态分析模型	376
13.7	控制参数设置调查	378
13.8	仿真结果的比较	378
13.9	应用的控制参数	381
13.10	暂态分析验证	382
13.11	运行试验验证	384
13.12	结论	385
	参考文献	386
第 14 章 接地系统的暂态过程		388
14.1	引言: 电力系统的暂态过程和接地系统	388
14.2	接地系统的基本计算	388
14.3	暂态电流的接地电极响应	390
14.3.1	概述	390
14.3.2	谐波电流对接地电极特性的影响	391
14.3.3	土壤电阻率和介电常数的频率相关性	394
14.3.4	脉冲电流的接地电极特性	397
14.3.5	土壤电离效应	399
14.4	接地电极暂态响应的数值仿真	400
14.4.1	基本思路	400
14.4.2	接地电极响应的一般结果	402
14.4.3	流过雷电电流时电极接地电位上升	404
14.4.4	首次和后续回击电流的脉冲阻抗和冲击系数	404
14.5	案例: 接地电极对输电线路雷电响应的影响分析	405
	参考文献	409

第 1 章 电路理论应用方法和数值电磁分析介绍

A. Ametani

1.1 基于电路理论方法的 EMTP

作为基于电路理论方法的仿真工具，电磁暂态仿真程序（EMTP）应用最为广泛并有着较高的知名度。其原型是由美国能源部邦纳维尔电力管理局（Bonneville Power Administration）自 1966 年到 1984 年开发的。目前存在三种较为成熟的 EMTP 型仿真工具，即 EMTP - ATP、EMTP - RV 和 EMTDC/PSCAD。这些工具的详细信息在第 2 ~ 4 章中进行说明。

EMTP 型仿真工具基于电路理论中波传播的横向电磁（TEM）模式假设。因此，它们不能仿真非 TEM 模式波传播相关的现象。不仅是从理论分析的角度，从分析中所用参数的角度也是如此。例如，如果在 TEM 模式传播的假设下导出架空线的阻抗和导纳，这些参数将不适用于涉及非 TEM 模式传播的现象。

1.1.1 EMTP 原型概述

在电路理论中，EMTP 型数值仿真工具采用节点分析法求解给定电路中的未知电压和电流^[1-4]。通常，节点分析法需要计算节点导纳矩阵的逆，获得联立节点方程的解。节点导纳矩阵是由电阻、电感和电容组成的，所以该矩阵是个复矩阵，并且分析实际电力系统时其规模非常大，导致求逆的数值计算需要大量计算资源。在 20 世纪 60 年代和 70 年代，当美国内政部〔后来的能源部（DOE）〕的邦纳维尔电力管理局（Bonneville Power Administration）对 EMTP 原型进行开发时，当时的计算机对规模巨大的复数矩阵求逆是非常困难的。

基于上述事实，被称为 EMTP 之父的 H. W. Dommel 教授采用仅含一个电阻和一个电流源的等效电路来代表电力系统中的任何电路元件的想法，使得节点导纳矩阵变为电导矩阵，即由复矩阵变为了实矩阵^[1]。由于导纳矩阵非常稀疏，在潮流和稳定性分析领域较为常见的基于稀疏矩阵的矩阵化简方法也被采用^[5,6]。

为了处理诸如架空线和地下电缆等分布参数线路，EMTP 引入了 Schnyder - Bergeron 方法^[7-9]，即数学上一种求解偏微分方程的特征线法^[1,10]。后来，处理由于导体（包括大地）趋肤效应造成分布线路频率相关性的方法也在 EMTP 中得以实现^[11-14]。

如表 1.1 所示，从 20 世纪 70 年代末到 80 年代初，各种电力系统元件如旋转

电机、避雷器等被加入到 EMTP 中^[3,4,15-32]。其中，一个极为重要的部分是被称为控制系统暂态分析 (TACS) 的子程序^[15]，后调整为由 L. Dube 开发的“MODELS”^[32]。TACS 和 MODELS 是一种计算机语言，用来处理含数学方程的控制电路，与计算电力系统暂态或动态行为的 EMTP 主程序交互运行。非常遗憾的是，由 L. Dube 提出的 TACS 支撑理论不能被 20 世纪 70 年代 IEEE Transactions 的任何评阅者理解，导致没有描述 TACS 的 IEEE Transaction 论文发表。因此虽然 L. Dube 所做的与 TACS/MODELS 相关工作远远超过一个博士学位研究水平，但并未被授予博士学位。

表 1.1 EMTP 原型中制定的电力系统元件和子程序

a) 电路元件		
元件	模型	备注
集总 R, L, C	串联、并联	
导线/电缆	多相 π 形电路	架空，地下
	常参数频率相关型分布线	Semlyen, Marti, Noda
变压器	互耦 $R-L$ 元件	单相，三相
	N 绕组，单相	饱和，磁滞
	三相壳型	
	三相三柱芯型	
负载，非线性	阶梯型时变电阻 (97 型)	非线性电阻
	分段时变电阻 (91、94 型)	非线性电感
	伪非线性电阻 (99 型)	时变电阻
	伪非线性电感 (98 型)	
	伪非线性磁滞电感 (96 型)	
避雷器	指数函数型氧化锌	有缝，无缝
	闪络型三相电阻器	
电源	阶跃型 (11 型)	电压源
	分段线性 (12、13 型)	电流源
	正弦型 (14 型)	浪涌函数
	冲激型 (15 型)	
	TACS 受控源	
旋转电机	同步发电机 (59 型)	同步，感应，直流
	通用电机	
开关	时控开关	断路器
	闪络开关	隔离开关
	统计/系统开关	真空开关
	测量开关	
	TACS 控制开关 (12、13 型)	
	TACS 控制弧模型	
半导体	TACS 控制开关 (11 型)	二极管，晶闸管
控制电路	TACS (模型)	传递函数，控制动力学 算术，逻辑

(续)

b) 支持程序		
名称	功能	输入数据
LINE CONSTANTS	架空线参数	频率, 结构, 物理参数
CABLE CONSTANTS	架空/地下电缆参数	频率, 结构, 物理参数
XFORMER	变压器参数	结构, 额定值, % Z
BCTRAN	变压器参数	结构, 额定值, % Z
SATURATION	饱和参数	结构, 额定值, % Z
HYSTERESIS	磁滞参数 (96 型)	结构, 额定值, % Z
NETEQV	等效电路	电路结构, 阻抗, 导纳, 频率
Marti/Semlyen Setup	频率相关型导线	由 LINE CONSTANTS 或 CABLE CONSTANTS 给出

1.1.2 节点分析法

节点分析可以由以下公式定义。

$(I) = [Y] \cdot (V)$ (1.1)

式中, I 是电流, V 是电压, Y 是节点导纳, $()$ 代表列向量, $[]$ 代表整个矩阵。

节点分析需要从联立节点方程建立节点导纳矩阵入手。例如, 计算图 1.1 所示电路的节点导纳矩阵。通过将基尔霍夫电流定律应用于电路中的节点 1 ~ 3, 获得以下联立方程:

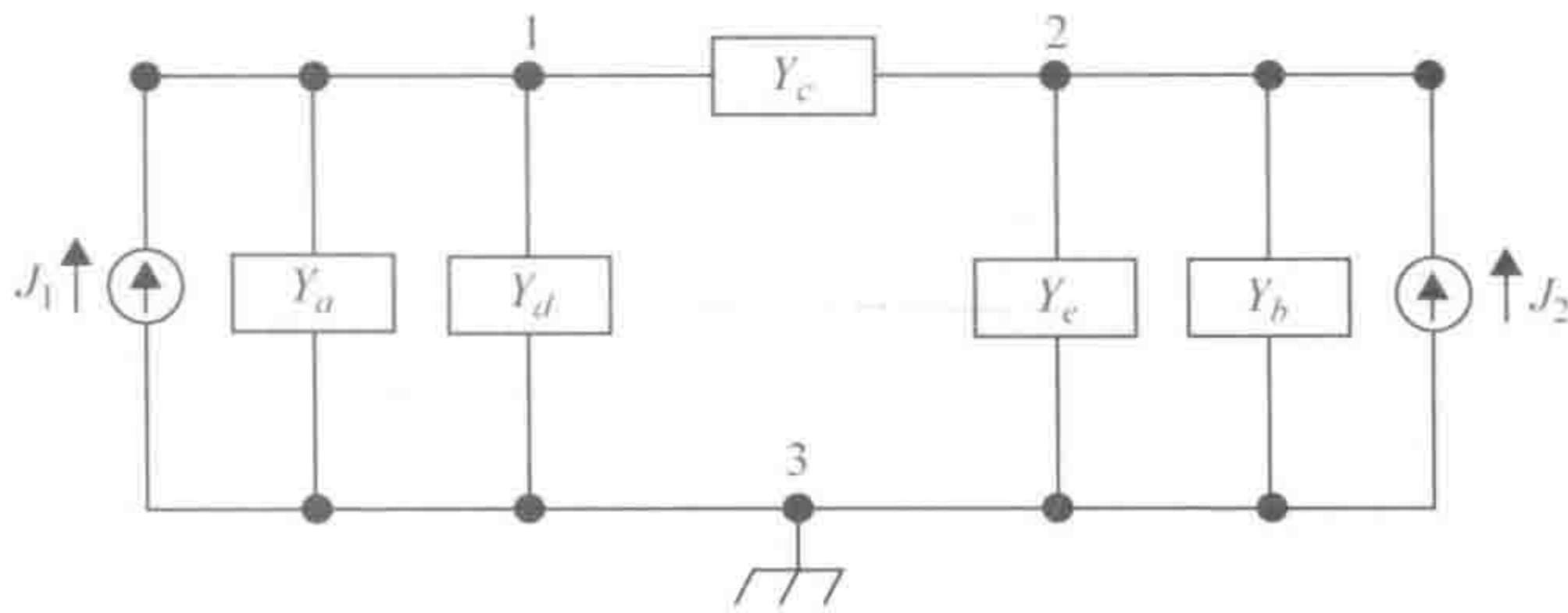


图 1.1 节点分析

$(Y_a + Y_c + Y_d) V_1 - Y_c V_2 = J_1$
 $- Y_c V_1 + (Y_b + Y_c + Y_e) V_2 = J_2$

将上述方程写成矩阵形式:

$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{12} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_1 \\ J_2 \end{pmatrix}$

或者

$[Y](V) = (J)$ (1.2)