

电力系统 建模理论与方法

鞠 平 著



科学出版社
www.sciencep.com

电力系统建模理论与方法

鞠 平 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

电力系统建模是电力系统计算、分析和控制的基础,国内外正在广泛开展相关工作,本书旨在对电力系统建模的研究和应用起到一定的推动作用。本书内容涵盖了电力系统建模的各个主要方面,首先介绍电力系统建模的基本理论和基本技术,然后重点介绍在学术上、应用上都十分重要的同步发电机组建模、电力系统动态等值建模以及电力负荷建模,最后介绍电力系统建模的其他方面,包括电力系统建模比较成熟的方面(如输电线路建模、火电厂建模、水电厂建模)和电力系统建模比较新颖的方面(如风力发电建模、微网建模、整体建模)。对于每个建模问题,都是先介绍模型结构,再介绍建模方法,最后介绍算例或实例,以加深读者的理解。

本书既适合科研人员和研究生阅读,也适合管理、设计、生产部门的人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统建模理论与方法 / 鞠平 著. —北京:科学出版社,2010

ISBN 978-7-03-028362-7

I. 电… II. 鞠… III. 电力系统-系统建模-研究 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 140737 号

责任编辑:余 丁 潘继敏 / 责任校对:朱光兰

责任印制:赵 博 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 8 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010 年 8 月第一次印刷 印张:24 3/4

印数:1—3 000 字数:481 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

前 言

电力系统仿真计算已经成为电力系统设计、运行与控制中不可缺少的手段,人们对仿真计算的精度要求越来越高,而这是以电力系统模型为基础的。电力系统模型对电力系统的计算结果影响很大,在临界情况下还有可能改变定性结论,掩盖一些重要现象,构成系统的潜在危险,造成不必要的浪费。比如,进行电力系统规划时,采用不同的电力系统模型,在临界情况下计算结果可能相差一条线路的投资;在进行电力系统分析计算时,改变模型参数可以明显提高输送功率极限。

在过去的几十年间,电力系统建模方面已经取得相当多的成果,我国电力科技工作者为此作出了重要贡献。沈善德教授所著的《电力系统辨识》(清华大学出版社,1993)是电力系统建模领域的开山之作。此后,笔者出版了《电力系统负荷建模》(第一版,水利电力出版社,1995;第二版,中国电力出版社,2008)和《电力系统非线性辨识》(河海大学出版社,1999)。近期,章健教授出版了《电力系统负荷模型与辨识》(中国电力出版社,2007)。这几本专著要么局限于辨识方法,要么局限于电力负荷建模,内容具有局限性。有鉴于此,笔者就自己近年来对电力系统建模研究的最新成果,写成此书,希望对关心这一领域的广大电力工作者有所裨益。书中大部分内容是我们团队的研究成果,对于他人的成果书中均加以引用标注。限于作者理论水平和实践经验,书中难免有不足或有待改进之处,尚希读者不吝指正。

本书共8章。第1~3章,介绍电力系统建模的基本概念、基本理论和基本技术。第4~6章,重点介绍在学术上、应用上都十分重要的同步发电机组建模、动态等值建模及电力负荷建模。第7章和第8章,介绍电力系统建模的其他方面,包括输电线路建模、风力发电建模、微网建模、整体建模等。对于每个建模问题,坚持理论与实践相结合。

本书研究工作得到下列基金的资助:国家杰出青年科学基金(No. 50725723)、国家自然科学基金青年基金项目(No. 58907448)、面上项目(No. 59677014)、重大项目(No. 50595412),国家重点基础研究专项经费项目(No. 2004CB217901),高校优秀青年教师奖励计划(No. 2001505043),“十一五”国家科技支撑计划重大项目(No. 2008BAA13B02)等。

研究团队成员吴峰、韩敬东、陈谦、金宇清、周海强、孙黎霞、潘学萍、王万成、秦川等参与了部分研究工作,并且撰写了书中部分小节,其中吴峰撰写了7.4.1节、7.4.2节、7.4.3节,金宇清撰写了7.4.4节,周海强撰写了5.4.5.4节,潘学萍撰写

了7.3节,王万成撰写了5.6节,秦川撰写了3.2.2节。从这个意义上来说,他们都是本书的合作作者。国家电网公司及其所属网、省电力公司为我们的研究成果提供了实践和应用的机会。研究生李德丰、倪腊琴、董峰、傅蓉、周小尧、李靖霞、姜巍、廖迎晨、赵夏阳、王光、苏文辉、丛岫、金艳、程颖、王勇、袁洪、张仰飞、刘文彪、宋健华、李育燕、左英飞、谢欢、戴琦、岳陈熙、谢宏杰、郑世宇、杜文娟、王卫华、糜作维、熊传平、王启明、邵正炎、钟晓勇、黄其新、方静、邱巍、何孝军、李成、陆杨文、施雄华、高运华、孔德超、茆超、徐羽、方鸣、李峥、谢会玲、侯学勇、宁艳、张孝、吴磊、蒋周士、杨辉、曹军杰、王舒琴、沈伟伟、陈燕萍、赵泽、刘利国、李成、夏梦等参与了部分研究或编辑工作。

余丁先生进行了编辑工作,朱庭菊女士帮助绘制了不少图表,本书的出版得到中国科学院科学出版基金的资助。

本书研究成果的取得,离不开导师韩祯祥教授、马大强教授和朱受天副教授的培养。

在我的求学和探索过程中,始终得到了父母的鼓励和妻儿的支持。

在此,一并表示衷心的感谢!

鞠 平

2010年8月于河海大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 电力系统建模的重要意义	1
1.2 电力系统建模的基本概念	2
1.2.1 电力系统模型	2
1.2.2 电力系统建模	2
1.2.3 电力系统辨识	2
1.2.4 电力系统建模对象	3
1.3 电力系统建模的研究概述	3
1.3.1 研究的难点	3
1.3.2 研究的历程	4
1.3.3 研究的趋势	4
参考文献.....	5
第 2 章 电力系统建模的基本理论	6
2.1 电力系统建模的基本途径	6
2.1.1 基于元件机理的方法	6
2.1.2 基于测量辨识的方法	6
2.1.3 基于仿真拟合的方法	7
2.1.4 混合方法	8
2.2 电力系统模型的结构特性	8
2.2.1 灵敏度	8
2.2.2 可辨识性.....	14
2.2.3 可区分性.....	26
2.2.4 可解耦性.....	27
2.2.5 难易度	29
2.3 电力系统线性模型的辨识方法.....	31
2.3.1 参数辨识概述	31
2.3.2 时域辨识方法	32
2.3.3 频域辨识方法	34
2.4 电力系统非线性模型的辨识方法.....	38

2.4.1	基本原理	38
2.4.2	电力系统非线性辨识的遗传方法	40
2.4.3	电力系统非线性辨识的进化策略方法	44
2.4.4	电力系统非线性辨识的蚁群方法	46
	参考文献	48
第3章	电力系统建模的基本技术	51
3.1	电力系统建模的数据采集与处理	51
3.1.1	数据的来源	51
3.1.2	数据的采集	51
3.1.3	数据的处理	53
3.2	电力系统建模的 WAMS 平台	57
3.2.1	WAMS 系统结构	57
3.2.2	相量测量方法	60
3.2.3	功角测量方法	63
3.3	电力系统建模的校验方法	66
3.3.1	基于残差的校验	66
3.3.2	基于干扰的校验	67
3.3.3	基于功率谱密度的前验	67
3.3.4	仿真算例	67
3.3.5	应用实例	70
3.4	电力系统建模系统	72
3.4.1	节点级建模装置	72
3.4.2	系统级建模系统	73
3.4.3	分层次一体化建模系统	75
	参考文献	78
第4章	同步发电机组的建模	80
4.1	概述	80
4.1.1	研究意义	80
4.1.2	研究现状	81
4.1.3	研究趋势	82
4.2	同步发电机的模型	83
4.2.1	同步发电机的 Park 模型	83
4.2.2	同步发电机的实用模型	85
4.2.3	Park 模型与实用模型的参数关系	88
4.3	同步发电机建模的抛载方法	95

4.3.1 抛载后的动态过程	95
4.3.2 参数辨识	97
4.3.3 仿真算例	99
4.4 同步发电机建模的时域方法	101
4.4.1 基于实用模型的参数辨识	101
4.4.2 基于 Park 模型的参数辨识	111
4.5 同步发电机建模的频域方法	119
4.5.1 基本原理	119
4.5.2 可辨识性分析	120
4.5.3 频域灵敏度分析	122
4.5.4 仿真算例	123
4.6 同步发电机建模中的饱和问题	127
4.6.1 同步发电机的饱和效应	127
4.6.2 计及饱和的模型	128
4.6.3 仿真算例	128
4.7 励磁系统的建模	131
4.7.1 励磁系统的组成	131
4.7.2 励磁功率部分的模型	132
4.7.3 电压测量与电流补偿部分的模型	136
4.7.4 励磁控制部分模型	137
4.7.5 电力系统稳定器的模型	138
4.7.6 各种限制与保护的模型	138
4.7.7 励磁系统的参数实测	138
4.8 原动机及其调速系统的建模	141
4.8.1 原动机的模型	141
4.8.2 调速系统的模型	145
4.8.3 原动机与调速系统的参数实测	149
参考文献	151
第 5 章 电力系统的动态等值建模	154
5.1 概述	154
5.1.1 动态等值的目的意义	154
5.1.2 动态等值的研究内容	154
5.1.3 动态等值的研究进展	155
5.2 动态等值的方式	157
5.2.1 动态等值的方式	157

5.2.2	异步迭代算法	159
5.3	动态等值的模型	166
5.3.1	动态等值模型的结构	167
5.3.2	缓冲网节点的选择	168
5.3.3	动态等值模型的方程	169
5.4	动态等值建模的同调方法	171
5.4.1	基本原理	171
5.4.2	发电机群的动态等值	172
5.4.3	电动机群的动态等值	186
5.4.4	剩余网络的化简	191
5.4.5	仿真算例	192
5.5	动态等值的辨识方法	212
5.5.1	基本原理	212
5.5.2	动态等值模型的可辨识性	213
5.5.3	动态等值模型的参数辨识	217
5.5.4	动态等值的混合方法	218
5.5.5	仿真验证	219
5.5.6	工程实例	221
5.6	动态等值的模态方法	223
5.6.1	近似线性化模态方法	223
5.6.2	精确线性化模态方法	224
5.7	配电网的动态等值	232
5.7.1	配电网动态等值的模型结构	233
5.7.2	配电网动态等值的方法	233
5.7.3	仿真算例	237
5.8	地区电网的模型拼接	239
	参考文献	240
第6章	电力系统的负荷建模	244
6.1	概述	244
6.2	电力负荷的模型	246
6.2.1	经典负荷模型的结构	246
6.2.2	综合负荷模型的结构	246
6.2.3	负荷模型的方程	247
6.3	CLM建模的时域方法	249
6.3.1	基本原理	249

6.3.2	可辨识性分析	250
6.3.3	参数辨识方法	254
6.3.4	参数辨识实例	256
6.4	CLM 建模的频域方法	258
6.4.1	传递函数模型	258
6.4.2	仿真算例	260
6.5	SLM 建模的时域方法	265
6.5.1	可辨识性分析	265
6.5.2	简化 SLM 的参数辨识	271
6.5.3	完整 SLM 的参数辨识	274
6.5.4	带理想变压器 SLM 的参数辨识	283
	参考文献	289
第 7 章	电力系统的其他建模	294
7.1	输电线路的建模	294
7.1.1	概述	294
7.1.2	单电网断面下的参数可观测性分析	294
7.1.3	多电网断面下的参数估计	296
7.1.4	基于 PMU 的线路参数估计	297
7.1.5	算例验证	298
7.2	火电厂动力系统的建模	299
7.2.1	火电厂动力系统模型	300
7.2.2	交互影响计算分析	300
7.3	水电厂动力系统的建模	305
7.3.1	水电厂动力系统的模型	305
7.3.2	单机带负荷下的仿真算例	307
7.3.3	大干扰下的仿真算例	310
7.3.4	小干扰下的仿真算例	312
7.4	风力发电系统的建模	315
7.4.1	概述	315
7.4.2	基于双馈感应式发电机的风力发电系统的模型	318
7.4.3	基于直接驱动永磁发电机的风力发电系统模型	326
7.4.4	风电场的动态等值建模	332
7.5	微网的建模	343
7.5.1	概述	344
7.5.2	微网的元件模型	345

7.5.3 微网的总体模型	347
参考文献	351
第8章 广域电力系统的整体建模	355
8.1 概述	355
8.2 广域电力系统整体建模的基本方法	356
8.2.1 基本步骤	356
8.2.2 特征变量	356
8.2.3 节点分类	357
8.2.4 系统指标	358
8.2.5 确定重点参数	358
8.3 广域电力系统整体建模的参数辨识	360
8.3.1 参数优化	360
8.3.2 软硬件实现	360
8.3.3 仿真算例	363
8.4 广域电力系统整体建模的一些对比	370
8.4.1 不同建模方法的对比	370
8.4.2 不同误差指标的对比	372
8.4.3 不同观测变量的对比	373
参考文献	377
附录A IEEE 10机39节点系统	379
附录B IEEE 3机9节点系统	383

第 1 章 绪 论

1.1 电力系统建模的重要意义

电力系统仿真计算不但是电力系统动态分析与安全控制的基本工具,也是电力生产部门用于指导电网运行的基本依据(周孝信,1997;汤涌等,2002;汤涌,2002;贺仁睦,2000;倪以信等,2002;王锡凡等,2003;Kundur,1994;沈善德,1993;CIGRE Task Force 38.02.08,1995;Evvard et al.,1998;EPRI EL-3894,1985;deMello et al.,1992)。而电力系统建模是仿真计算的基础,如果模型不够准确,在临界情况下有可能改变定性结论,或者掩盖一些重要现象。国际上近年来发生的一系列停电事故,比如美国与加拿大 2003 年的“8.14”事故、欧盟 2006 年的“11.4”事故等,事故分析报告中都指出由于所采用的模型缺乏准确性,难以再现事故特性。著名的案例是 WSCC 对 1996 年“8.10”事故的仿真(Kosterev et al.,1999;Pereira et al.,2002),一开始电力负荷采用静态模型,仿真结果是稳定的,不能再现事故时出现的增幅振荡。而后通过修改电力系统模型和参数,特别是将电力负荷采用电动机加静态模型,才能够仿真再现事故时的增幅振荡。

不恰当模型会使得计算结果与实际情况不一致,或偏乐观,或偏保守,从而构成系统的潜在危险或造成不必要的浪费。当缺乏准确模型时,人们常常试图采用所谓的“保守”模型,即模型计算出来的安全指标(如输送功率极限)比实际电力系统情况要低。这种做法对现代大型电力系统往往是不妥的。因为模型对大规模电力系统的正负影响事先难以确定,在某种情况下是“保守”的但在另一种情况下却有可能是“冒进”的。我国电力生产部门采用传统的电力系统仿真模型指导电力生产时,已经发现互联电网的稳定水平达不到预期目标,造成电能传输出现瓶颈,通过修改电力系统模型和参数有时能够提高传输功率极限达 25% 左右。所以,建立合适的电力系统模型,能够提高传输能力,或者消除安全隐患,具有显著的经济和社会效益(鞠平等,1989;张红斌等,2007;张鹏飞等,2007)。

长期以来,由于缺乏现场测量得到的具有统一时标的全网动态响应数据,电力系统的动态建模与仿真的准确度无法校核,加之模型和参数的管理尚不够严谨,影响了建模与仿真结果的可信度。随着计算机技术、通信技术尤其是广域测量技术的发展和运用,电力系统有了全网统一时钟,广域测量系统(WAMS)可以将电力系统受到扰动时的全网功角、相角、功率等动态响应曲线记录下来,为电力系统建

模提供了新的技术支持(鞠平等,2008)。

1.2 电力系统建模的基本概念

1.2.1 电力系统模型

电力系统模型可以分为物理模型和数学模型两大类。物理模型是根据相似原理构成的一种物理模拟,通过模型实验来研究系统的特性,电力系统动态模拟就是典型的例子。数学模型以数学表达式来描述实际系统的特性,通过数字仿真计算来分析其过程。物理模型具有物理概念明确、能自然包含各种复杂物理因素的优点,但模型实验代价高且费时费力,很难模拟大规模电力系统。数学模型虽然有时难以包含所有的物理因素,但随着计算机技术的迅速发展,用数字仿真计算进行分析研究已越来越显示出其简便、灵活、代价小等方面的优越性。因此,基于这两种模型的仿真技术因其特点互补而并存于世,同时发展出将两者综合在一起的混合仿真技术。

1.2.2 电力系统建模

本书只介绍电力系统的数学模型的建立,简称为建模。电力系统的数学模型可以从线性和非线性、静态和动态、参数和非参数等方面进行分类。

电力系统建模是对实际电力系统本质的简化描述,这包含两层涵义:一是模型必须能够正确描述系统的本质,二是模型应该尽量简单。模型的精确性和简单性往往存在着矛盾,一般需要根据实际问题对模型的要求找出这两者的合适解决方案。

1.2.3 电力系统辨识

辨识的实质就是从一组模型类中选择一个模型,按照某种准则,使之能最好地拟合所关心的实际过程的动态特性。辨识的基本过程如图 1-1 所示,即利用待测系统动态过程提供的输入、输出数据,不断调整模型参数甚至模型结构,使模型计算结果尽量接近实际结果。图中 X 是输入向量, Y 是理想输出向量, v 是量测噪声, Z 是量测输出向量, θ 是模型参数向量(包含结构)。

辨识方法可分为经典辨识方法和现代辨识方法两类。经典辨识方法是与经典控制理论相对应的,其建立的数学模型如传递函数、脉冲响应、频域特性等均属于此范畴。现代辨识方法适应现代控制理论的需要,其建立的数学模型有状态空间方程、差分方程等。

从辨识数据的处理过程看,辨识又可分为离线辨识和在线辨识两种。前者先

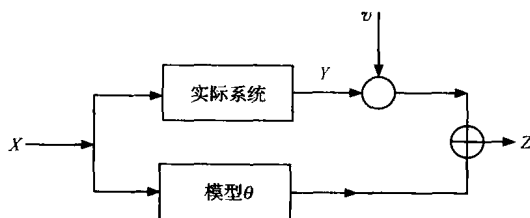


图 1-1 辨识过程

在现场记录数据,再离线处理数据以获得模型参数。后者则在线采集并处理数据以获得模型参数。

1.2.4 电力系统建模对象

电力系统建模的对象按照复杂程度分为两类:元件建模和等值建模。比如,同步发电机建模就属于前者,电力负荷建模则属于后者。一般来说,元件建模比等值建模要简单些。因为前者往往范围小、元件单一而且机理清楚,而后者则范围大、元件多而且复杂。

电力系统建模最主要是确定“四大参数”,即励磁系统及其调节器参数、原动机及其调节器参数、同步发电机参数、电力负荷参数。除此之外,电力系统建模还包括动态等值建模、输电线路建模、动力系统建模等。随着可再生能源发电技术的发展,风力发电系统建模等方兴未艾。随着对分布式发电和微网的研究逐步深入,微网建模也被提上议事日程。

1.3 电力系统建模的研究概述

1.3.1 研究的难点

电力系统具有一些特点:①电力系统在本质上是非线性的,虽然某些元件模型是线性的,但大多数模型是非线性的。②电力系统是高阶复杂系统,而实际计算中需要简化,如何在精确性与计算量之间取得平衡,是一个困难的问题。③电力系统是随机系统。第一,系统的运行状态有随机波动,如负荷功率、联络线功率;第二,系统中的干扰具有更大的随机性,如干扰的类型、地点、大小;第三,系统的参数也有随机变化,典型的如负荷参数。④电力系统的动态过程时间分布广。暂态过程在秒级,中期动态过程则在分钟级。

这些特点给电力系统建模带来诸多困难:①难点之一是电力负荷建模,因为它具有时变性、随机性、分布性、多样性、非连续性等特点。②难点之二是如何解决好参数的平稳性问题,这可能涉及模型的可辨识性、方法的鲁棒性、信号的频谱等一

系列因素。③难点之三是电力系统模型的校核,因为实际电力系统不可能停下来进行试验,而自然发生的大扰动是十分有限的。

1.3.2 研究的历程

电力系统建模的发展历程与电力系统数字模拟计算基本上是同步的。

20 世纪 50 年代末到 60 年代中期,电力系统数字模拟计算处于发展初期。在这段时间内,电力系统建模有了初步发展,建立了电力系统元件和系统的基本模型。

到了 20 世纪 60 年代末及 70 年代初,发电机、励磁系统、原动系统等模型向前发展了一大步,但负荷模型却因其困难性而在原有的水平上停滞不前。为了打破负荷建模研究上的困难局面,1976 年美国电力研究所(EPRI)制定了一个庞大的研究计划。根据这个计划,研究工作在美国和加拿大同时开展。整个工作经过了严密计划和组织,在理论、现场试验及数据采集系统的软、硬件开发和数据处理程序等几个方面全面展开。在这项工作的推动下,1980 年前后的几年里,负荷模型的研究有了新进展。在美国与加拿大 2003 年“8.14”大停电以后,联合调查组在其最终报告中指出以往采用的负荷模型不合适,此后美国 EPRI 采用国际招标开展了负荷建模的总体测辨方法的研究。

近年来,人们进一步认识到电力系统建模的重要性,掀起了新一轮的电力系统建模研究和实践的热潮(国家电网公司科技部,2007a,2007b)。我国国家电网公司将电力系统建模列为近期的重点工作,各地电网公司已经或者即将开展电力系统建模工作,如东北、西北、河南、江苏、福建、湖南、新疆、广东、浙江等。企业界的需求是电力系统建模工作的动力所在。

1.3.3 研究的趋势

从电力系统建模的规模来看,以往的研究基本上都是元件或者节点规模,即针对一个元件(如发电机)或者节点(如变电站),建立其模型。随着电力系统规模的扩大,广域电力系统的建模需要深入研究。其困难在于,广域电力系统中元件和节点面广量大,可能有成千上万个。如果对每个元件或者节点采用不同的参数,则不管是建模还是应用于计算,都是不现实的。如果对所有元件或者节点都采用相同的参数,虽然简单,但却不符合实际,会带来较大误差。

从电力系统建模的数据源来看,以往的数据来源大都单一。目前,所有电网都有 SCADA 系统,大部分电网已经安装了故障信息系统,部分电网开始安装 PMU/WAMS 系统。所以,笔者提出充分地、综合地利用现有的各种数据,开展电力系统建模工作。比如,利用 SCADA 中很容易获得的日负荷曲线,来获得负荷构成特征数据,甚至进行负荷静态特性建模。再如,利用 PMU 数据或故障录波数据辨识动

态特性参数,这样可使工作量小、投资也少。还有,利用 WAMS 数据进行建模或者校核等。

参 考 文 献

- 国家电网公司科技部. 2007a. 电力系统模型参数研究专辑之一. 电网技术, 31(4): 1-78
- 国家电网公司科技部. 2007b. 电力系统模型参数研究专辑之二. 电网技术, 31(5): 1-78
- 贺仁睦. 2000. 电力系统动态仿真准确度的探究. 电网技术, 24(12): 1-4
- 鞠平, 代飞, 金宇清, 等. 2008. 电力系统广域测量技术. 北京: 机械工业出版社
- 鞠平, 马大强. 1989. 电力负荷的动静特性对低频振荡阻尼的影响分析. 浙江大学学报, 23(5): 750-760
- 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 2002. 动态电力系统的理论和分析. 北京: 清华大学出版社
- 沈善德. 1993. 电力系统辨识. 北京: 清华大学出版社
- 汤涌, 宋新立, 刘文焯, 等. 2002. 电力系统全过程动态仿真的数值方法. 电网技术, 26(9): 1-6
- 汤涌. 2002. 电力系统数字仿真技术的现状与发展. 电力系统自动化, 26(17): 66-70
- 王锡凡, 方万良, 杜正春. 2003. 现代电力系统分析. 北京: 科学出版社
- 张红斌, 汤涌, 张东霞. 2007. 不同负荷模型对东北电网送电能力的影响分析. 电网技术, 31(4): 55-58
- 张鹏飞, 罗承廉, 鞠平, 等. 2007. 河南电网送端和受端负荷模型对稳定极限的影响. 电网技术, 31(6): 51-55
- 周孝信. 1997. 研究开发面向 21 世纪的电力系统技术. 电网技术, 21(11): 11-15
- CIGRE Task Force 38.02.08. 1995. Tools for long-term dynamics. Electra, (163): 151-165
- deMello F P, Feltes J W, Laskowski T F, et al. 1992. Simulating fast and slow dynamic effects in power system. IEEE Computer Applications in Power, 5(3): 33-38
- EPRI EL-3894. 1985. Long-term system dynamic simulation methods. Research Project 1469-1 Final Report
- Evard C, Bihain A. 1998. Powerful tools for various types of dynamic studies of power system//Proceedings of the POWERCON'98, Beijing
- Kosterev D N, Taylor C W, Mittelstadt W A. 1999. Model validation for the August 10, 1996 WSCC system outage. IEEE Trans on Power Systems, 14(3): 967-979
- Kundur P. 1994. Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill
- Pereira L, Kosteyev D, Mackin P, et al. 2002. An interim dynamic induction motor model for stability studies in the WSCC. IEEE Trans on PWRs, 17(4): 1108-1115
- Taylor C. 1994. Power System Voltage Stability. New York: McGraw-Hill

第2章 电力系统建模的基本理论

2.1 电力系统建模的基本途径

电力系统建模的基本途径可以归纳为4类:一是基于元件机理的方法(component based methodology, CBM);二是基于测量辨识的方法(measurement based methodology, MBM);三是基于仿真拟合的方法(simulation based methodology, SBM);四是混合方法(hybrid methodology, HM)。

2.1.1 基于元件机理的方法

电力系统建模的途径之一是按照元件的机理来建模,即根据电力系统元件的

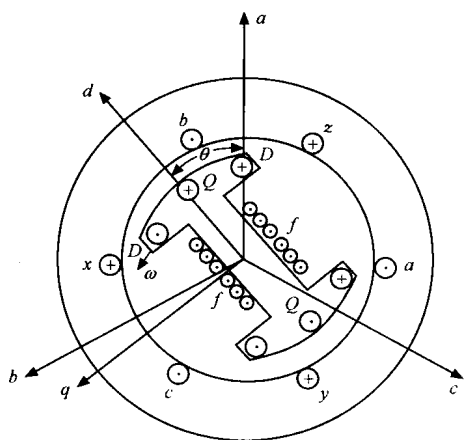


图 2-1 基于元件机理的同步发电机建模示意图

内在机理,按照基本的物理、化学等定理和定律来导出模型方程,再采用数值计算方法来获得参数,所得模型称为机理模型。

以同步发电机建模为例,基于元件的建模方法如图 2-1 所示,根据电磁和电路原理,可以建立图中绕组的磁链方程和电压方程。

这种方法的优点是,描述建模对象的模型方程具有机理内涵,模型参数的物理概念清晰,便于分析和应用。但机理模型是在一定的假设和简化条件下得出的,具有局限性。对一些复杂的过程和因素,有时难以或者无法采用常规数学模型加以描述。例如,电力负荷的一些复杂因素、发电机的饱和因素等。

2.1.2 基于测量辨识的方法

电力系统建模的途径之二是通过测量建模对象的运行或实验数据来辨识模型,可简称为测辨法。

以电力负荷建模为例,基于测量辨识的建模方法如图 2-2 所示,根据从变压器