

全国普通高校电气工程及其自动化专业规划教材

Power System Steady State Analysis

电力系统稳态分析

艾芊◎编著

Ai Qian



清华大学出版社



全国普通高校电气工程及其自动化专业规划教材

Power System Steady State Analysis

电力系统稳态分析

艾芊◎编著

Ai Qian

清华大学出版社

内 容 简 介

本书以电力系统潮流计算及其应用为主线,主要介绍涉及电力系统稳态运行和特征的理论模型和算法。本书分为九篇:第一、二、三篇,主要介绍常规潮流算法、最优潮流(OPF)法和连续潮流法(CPF);第四篇,介绍静态安全分析的定义和内容;第五篇,介绍电力系统中重要元件,如发电机、励磁系统、调速系统及原动机、负荷、电力电子元件等的数学模型和参数辨识方法;第六篇,介绍小干扰稳定分析,包括次同步谐振、低频震荡和单调不稳定性等;第七篇,介绍坐标变换在电力系统中的应用;第八篇,阐述不对称故障分析的一般方法;第九篇,介绍经典的鱼形曲线。前八篇内容分别阐述了电力系统稳态特性和分析方法及其应用,第九篇简洁描述了暂态基本特征和分析的数学基础,同时,也增加了一些新的设备与技术的介绍。

本书可供从事电力系统运行、规划和科学研究的人员参考,并可作为高等院校电气工程专业电力系统分析的研究生教材。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电力系统稳态分析/艾芊编著.--北京:清华大学出版社,2014

全国普通高校电气工程及其自动化专业规划教材

ISBN 978-7-302-34715-6

I. ①电… II. ①艾… III. ①电力系统稳定—系统分析—高等学校—教材 IV. ①TM712

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 292374 号



责任编辑:李 鹏

封面设计:李召霞

责任校对:李建庄

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:26.5 字 数:658 千字

版 次:2014 年 8 月第 1 版 印 次:2014 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~1500

定 价:49.00 元

产品编号:052458-01

作为技术密集和资金密集的产业,电力工业又是国民经济的基础产业,其安全性、可靠性、经济性对国民经济有着巨大而深远的影响。近年来,智能电网概念的提出和技术的快速发展促使电力系统研究上了一个新的台阶,对电力系统有更深刻的认识。

在此背景下,本书希望能对电力系统进行一种详细描述与专题讨论。本书通过电力系统基本专题的论述,让读者对电力系统的本质及运行特点有更全面的了解。本书以电力系统潮流分析和应用为主线,较详细地阐述了电力系统稳态分析所涉及的知识。

本书分为九篇:

第一篇,潮流计算——电力系统分析的基础。主要介绍进行电力系统稳态和暂态分析之前所要解决的问题,即潮流计算,包括:潮流的定义、基本潮流的解法和应用等。

第二篇,最优潮流(OPF)。寻求潮流多解中的最优解,为有功优化和无功优化提供一种解决方案。

第三篇,连续潮流法(CPF)。静态电压稳定分析中常用的一种方法。

第四篇,静态安全分析。介绍静态安全分析的定义和内容。

第五篇,电力系统建模。介绍电力系统中重要元件,如发电机、励磁系统、调速系统及原动机、负荷、电力电子元件等的数学模型和参数辨识方法。

第六篇,小干扰稳定分析。介绍次同步谐振、低频振荡和单调不稳定性等。

第七篇,坐标变换及其在电力系统中的应用。介绍电力系统中常用的坐标变换和应用场合。

第八篇,不对称故障分析方法。介绍不对称故障分析的一般方法。

第九篇,电力系统暂态分析基础。介绍经典的鱼形曲线。

上述前八篇内容阐述了电力系统稳态特性、分析方法及其应用,第九篇简洁描述了暂态基本特征和分析的数学基础,同时,也增加了一些新的设备与技术的介绍。

本书作为电气工程专业电力系统稳态分析的研究生教材,适当介绍有关课题的最新进展及发展方向。读者应已具备电气专业本科相关知识。本书也可供从事电力系统运行、规划设计和科学研究的人员参考。

著者感谢硕士生苑仁峰、安怡然、汪诗怡等对本书整理所做的工作。对于因作者水平和实践经验有限而导致本书存在的缺点和不足之处,还望读者批评指正。

编 者

2014年5月于上海交通大学

第一篇 潮流计算——电力系统分析的基础

引言	2
第 1 章 潮流方程的含义及圆方程的应用	4
1.1 潮流方程的含义	4
1.2 圆方程的应用	6
1.3 小结	9
第 2 章 电力网络方程的前处理过程	10
2.1 因子表法	10
2.2 稀疏技术——稀疏向量法	10
2.3 节点编号优化方法	11
第 3 章 N-R 法在潮流计算中的应用	16
3.1 N-R 法的原理	16
3.2 N-R 法的特点	17
3.3 N-R 法的局限性	17
3.4 定雅克比矩阵法潮流计算	18
3.5 保留非线性的潮流计算方法	21
第 4 章 PQ 分解法在潮流计算中的应用	25
4.1 PQ 分解法	25
4.2 配电网潮流计算	26
4.3 小结	27
第 5 章 带二阶项的潮流计算	28
5.1 带二阶项潮流算法提出的背景	28
5.2 二阶潮流算法的提出	28
5.3 二阶潮流计算数学模型	28
5.4 二阶算法的改进	31
5.5 二阶潮流算法的应用	31
5.6 小结	31

第 6 章 含直流输电与柔性输电的电力系统潮流计算	32
6.1 概述	32
6.2 交直流混合电力系统潮流计算	33
6.3 含 FACTS 元件的潮流计算	38
第 7 章 含分布式电源的配电网潮流计算	42
7.1 含分布式电源的配电网潮流计算的背景	42
7.2 传统配电网的潮流计算	42
7.3 DG 并网的接口	44
7.4 DG 在潮流计算中的模型	44
7.5 改进的前推回推法	46
7.6 小结	48
参考文献	49

第二篇 最优潮流

引言	52
第 1 章 最优潮流简介	53
1.1 最优潮流的概述	53
1.2 最优潮流的目标函数	54
1.3 最优潮流的约束条件	55
1.4 最优潮流的求解算法概述	56
1.5 小结	58
第 2 章 内点法与外点法	59
2.1 内点法、外点法及其在最优潮流中的算法	59
2.2 算例分析及注意问题	62
2.3 内点法的优点和局限	65
2.4 小结	65
第 3 章 线性规划法	66
3.1 线性规划法的提出	66
3.2 线性规划法的发展	66
3.3 最优潮流的线性规划模型和解算步骤	66
3.4 线性模型的求解——原对偶路径跟踪法	70
3.5 算例分析	71

3.6 小结	73
第4章 非线性规划	74
4.1 非线性模型求解概述	74
4.2 原对偶非线性变尺度优化潮流算法	74
4.3 GPDNR-OPF 算法	76
4.4 算例仿真	77
4.5 小结	79
第5章 二次规划	80
5.1 二次规划算法的提出	80
5.2 二次规划算法的特点	80
5.3 二次规划的模型	80
5.4 基于网络分块的分解协调模型	80
5.5 基于辅助问题原理的并行优化	81
5.6 子系统优化问题的序列二次规划法求解	82
5.7 算例	83
5.8 小结	84
第6章 人工智能算法	85
6.1 人工智能算法提出的背景	85
6.2 典型人工智能算法简介	85
6.3 遗传算法及其应用	89
6.4 小结	96
第7章 混合规划法	97
7.1 混合规划法的概念与关键	97
7.2 混合规划法的优势	97
7.3 混合规划法的研究现状	98
7.4 混合规划法研究案例一	98
7.5 混合规划法研究案例二	100
7.6 混合规划法研究案例三	103
7.7 小结	105
第8章 最优潮流的应用	106
8.1 最优潮流在电力市场中的应用	106
8.2 最优潮流的新应用	106
参考文献	109

第三篇 连续潮流

引言	112
第 1 章 绪论	113
1.1 静态电压稳定分析	114
1.2 静态安全分析方法简介	116
1.3 小结	118
第 2 章 连续潮流模型及算法	119
2.1 连续潮流法数学基础	119
2.2 连续潮流模型分类	119
2.3 连续潮流计算步骤	120
第 3 章 连续潮流算法改进	125
3.1 预测过程的改进	125
3.2 步长算法的改进	126
3.3 结合 P-Q 分解法和 Lagrange 插值二次插值技术的 连续潮流改进算法	129
3.4 其他改进算法简介	130
3.5 小结	131
第 4 章 电力系统约束对静态电压稳定的影响	132
4.1 节点类型转换机制	132
4.2 基于连续潮流的静态电压稳定极限求取方法	134
4.3 算例分析	140
4.4 小结	144
第 5 章 连续潮流的应用	145
5.1 连续潮流的应用范围	145
5.2 连续潮流在电压稳定中的应用	145
5.3 连续潮流在可用输电能力中的应用	149
总结	151
参考文献	152

第四篇 静态安全分析

引言	154
第 1 章 静态安全分析的补偿法	155
1.1 网络单一开断的补偿法潮流计算	155
1.2 网络同时出现两处或多处断线的补偿法潮流计算	157
1.3 计算实例	157
1.4 对补偿法的评价	157
第 2 章 静态安全分析的直流法	158
2.1 直接潮流模型	158
2.2 直流潮流断线分析	159
2.3 直流法的优缺点	163
2.4 $N-1$ 校验与故障排序方法	163
2.5 直流法应用与改进	166
第 3 章 静态安全分析的灵敏度法	168
3.1 基本原理	168
3.2 节点注入功率的增量	169
3.3 算法的实现	172
第 4 章 传统方法对比及算例	173
4.1 静态安全分析传统算法方法对比	173
4.2 静态安全分析具体算例分析	174
总结	177
参考文献	178

第五篇 电力系统建模

引言	180
第 1 章 概述	181
1.1 电力系统模型建立的意义	181
1.2 电力系统建模研究的历程	181

1.3	电力系统建模研究的基本途径	182
1.4	小结	182
第2章	同步电机的模型建立	183
2.1	同步电机模型的历史背景	183
2.2	同步电机模型的建立过程	183
2.3	同步电机实用模型	186
2.4	同步电机参数辨识	189
2.5	小结	190
第3章	原动机及调速系统的数学模型	191
3.1	水轮机和汽轮机建模	191
3.2	调速器模型	194
3.3	展望	195
第4章	发电机励磁系统的模型建立	196
4.1	励磁系统的数学模型	196
4.2	完整的励磁系统数学模型	199
4.3	励磁系统的辨识方法	200
4.4	小结	201
第5章	负荷模型及其参数获取方法	202
5.1	引言	202
5.2	负荷模型	202
5.3	负荷模型参数获取方法	207
5.4	小结	211
第6章	输电线路的模型建立	212
6.1	输电线路模型的研究背景	212
6.2	输电线路模型的基本原理	212
6.3	小结	215
第7章	电力电子元件建模	216
7.1	概述	216
7.2	非线性系统的稳定分析方法	220
7.3	电力电子元件的详细模型	228
7.4	IGBT 参数辨识智能优化算法的应用及改进	244
总结	.....	251

参考文献	252
------	-----

第六篇 小干扰稳定分析

引言	258
第 1 章 电力系统小干扰稳定基础	259
1.1 电力系统小干扰稳定性简介	259
1.2 单机无穷大系统小干扰稳定性分析	259
第 2 章 电力系统低频振荡	265
2.1 低频振荡研究的意义	265
2.2 低频振荡的机理	265
2.3 低频振荡分析方法	267
2.4 低频振荡的抑制方法	268
2.5 电力系统发生振荡的处理方式	269
第 3 章 小干扰稳定在有功优化调度中的应用	270
3.1 传统有功优化调度模型	270
3.2 小干扰稳定约束的处理	270
3.3 线性化的传统有功优化调度模型	271
3.4 小干扰稳定约束的线性化	271
3.5 小结	272
第 4 章 小干扰稳定在风电机网扭振研究中的应用	273
4.1 次同步谐振	273
4.2 风电机组轴系数学模型	273
4.3 定速异步风电机组数学模型	277
4.4 机网扭振相互作用的小干扰稳定分析	282
4.5 小结	283
参考文献	284

第七篇 坐标变换及其在电力系统中的应用

引言	286
第 1 章 Park 变换、Clarke 变换及对称分量法	287
1.1 Park 变换及其原理	287

1.2	电机方程结合 Park 变换	287
1.3	Clarke 变换	289
1.4	Clarke 变换与 Park 变换的联系	290
1.5	对称分量法的应用	290
第 2 章	Park 与 Clarke 公式推导	292
2.1	电力系统 <i>abc</i> 三相坐标系	292
2.2	Clark 变换	292
2.3	Park 变换	294
第 3 章	Park 和 Clarke 变换应用	296
3.1	Park 变换与畸变圆的应用	296
3.2	Clarke 矢量图形识别	297
3.3	Clarke 矢量图形识别法应用	297
3.4	频谱分析、灵敏因子	298
3.5	Park&Clarke 变换在电机矢量控制中的应用	299
第 4 章	小波变换及其应用	301
4.1	前言	301
4.2	小波变换理论推导	301
4.3	小波变换及其基本性质	303
4.4	小波变换在电力系统中的应用	304
第 5 章	Fourier 变换及其在电力系统中的应用	311
5.1	傅里叶变换的本质	311
5.2	短时傅里叶变换	311
5.3	基于 Fourier 变换的频谱分析	312
5.4	傅里叶变换在谐波分析中的应用	313
总结	.....	314
参考文献	.....	315

第八篇 不对称故障的分析方法

引言	.....	318
第 1 章	简单不对称故障分析	319
1.1	概述	319

1.2	不对称故障分析	319
1.3	电力系统元件的序参数	324
1.4	电力系统零序网络及零序导纳矩阵	328
1.5	对称分量法计算不对称短路的方法	330
1.6	对称分量法不对称断线故障分析	334
1.7	小结	335
第 2 章	电力系统复杂故障分析	336
2.1	前言	336
2.2	双端口网络的端口参数方程	336
2.3	两种端口参数方程的形式	339
2.4	电力系统双重故障分析	342
2.5	N 重复故障的计算	350
2.6	多端口网络故障分析方法的改进算法	352
2.7	小结	355
第 3 章	不对称故障分析的其他方法	356
3.1	前言	356
3.2	相分量法	356
3.3	瞬时对称分量法	359
3.4	小结	361
第 4 章	不对称故障时系统中各电气量值的分布	362
4.1	前言	362
4.2	各序电流、电压和功率分布计算基本方法及其分布规律	362
4.3	单侧电源不对称短路时各相电压沿线路的分布情况	367
4.4	小结	370
总结	.....	371
参考文献	.....	372

第九篇 电力系统暂态分析基础

引言	.....	374
第 1 章 数值算法	.....	376
1.1	暂态稳定的数学模型	376

XII · 电力系统稳态分析

1.2	常用的数值算法	377
1.3	算例分析	379
第2章	直接法	382
2.1	电力系统经典模型	382
2.2	多机系统的暂态能量函数	383
2.3	临界能量的求取	385
2.4	算例分析	387
2.5	直接法的优缺点	388
第3章	简单模型下的暂态稳定分析	390
3.1	初值计算	390
3.2	用直接法求解网络方程	391
3.3	用改进欧拉法求解微分方程	392
第4章	暂态稳定计算的在线应用	394
4.1	快速数值积分法	394
4.2	紧急扩展等面积法则	397
第5章	鱼形曲线	400
5.1	类比模型介绍	400
5.2	电力系统模型介绍	401
5.3	暂态能量方程	402
5.4	鱼形曲线	403
总结	.....	406
参考文献	.....	407

潮流计算

——电力系统分析的基础

引言

- 第 1 章 潮流方程的含义及圆方程的应用
- 第 2 章 电力网络方程的前处理过程
- 第 3 章 N-R 法在潮流计算中的应用
- 第 4 章 PQ 分解法在潮流计算中的应用
- 第 5 章 带二阶项的潮流计算
- 第 6 章 含直流输电与柔性输电的电力系统潮流计算
- 第 7 章 含分布式电源的配电网潮流计算

电力系统是一个强非线性动力学系统。潮流计算是为其状态赋予初值,或者是稳态时一个可行的运行状态。因此,电力系统潮流计算和分析是电力系统稳态和暂态分析的基础。

电力系统潮流计算是研究电力系统稳态运行情况的一项基本运算,其数学本质是一组多元非线性方程,主要采用迭代的方法求解。电力系统潮流计算从提出至今,经历了一个由手工计算到利用交、直流计算台计算,再到应用数字电子计算机计算的发展过程,现有的潮流算法都以计算机的应用为前提。由于潮流计算在电力系统分析研究中具有重要的地位,吸引了大量的专家学者对其进行了研究,针对各种实际情况以及特殊需求,发展出多种用于电力系统潮流计算的计算机算法。

在现有的潮流算法中,最早出现的是常规潮流算法,其他潮流算法都是根据不同的实际需求在常规潮流的基础上发展起来的。利用电子计算机进行电力系统潮流计算始于20世纪50年代中期,最初以节点导纳矩阵为基础进行迭代,其原理简单,易于编程实现,同时由于导纳矩阵是稀疏矩阵,对计算机内存需求不大。但是此法收敛性较差,其迭代次数会随着系统规模的扩大而急剧增加,易出现不收敛的情况。在这种情况下,出现了基于阻抗矩阵的迭代方法,大大改善了潮流计算的收敛性,可以求解一些用导纳法无法收敛的潮流问题。但是,阻抗矩阵是满秩矩阵,不但占用内存大,而且每次迭代所需的计算量也比较大,这就引入了新的问题。随后出现的分块阻抗法,它将一个大系统分为若干小系统,只需存储各个小系统的阻抗矩阵以及它们之间联络线的阻抗,此法能够在一定程度上克服阻抗法对内存需求大以及计算效率低的缺点。

为了使潮流算法得到进一步的完善,数学中求解非线性问题的经典方法——牛顿-拉夫逊方法也被引入到了电力系统潮流计算当中。它以导纳矩阵为基础,其方程有直角坐标和极坐标两种形式,在不同的应用情况下各有所长。相对于阻抗法来说,它在保证良好收敛性以及计算精度的前提下,降低了对计算机内存的需求,提高了运算速度。正因如此,牛顿-拉夫逊法至今仍然是使用最广泛、效果最好的一种潮流计算方法,也是目前所有潮流计算机算法中最为成熟的一种方法。此后,由牛顿-拉夫逊法的极坐标形式经过一定的简化和改进而得到的PQ分解法(又称改进牛顿法),也是一种性能比较优越的潮流计算方法。它根据电力系统的特点,抓住主要矛盾,以有功功率误差作为修正电压相角的依据,以无功功率误差作为修正电压幅值的依据,使有功功率和无功功率迭代分开进行,不但降低了修正方程组的阶数,而且使雅可比矩阵的元素在整个迭代过程中维持常数,不必在每次迭代时重新求解,因而在运算速度方面较以前的潮流算法有了很大的突破。由于速度上的明显优势,PQ分解法还可以用于在线计算。

目前,常规潮流算法仍然大量地应用于电力系统各个领域,但由于其模型过于简单,不能全面考虑系统运行时多方面的实际情况,同时选择不同的发电机节点作为平衡节点也会使所得的潮流结果存在差异,因而在一些特殊的场合以及特定需求下,产生了以常规潮流为基础,而又在某些方面具有特殊功能的其他潮流算法。

本篇主要讲述电力系统潮流的基本定义、常用计算方法和应用。内容分为7章:第1

章介绍电力潮流方程的含义及圆方程的应用；第2章讨论电力网络方程的前处理过程；第3、4章分别阐述N-R法、PQ分解法在潮流计算中的应用；第5、6章主要讨论带二阶项和含直流输电与柔性输电的电力系统潮流计算；第7章介绍了含分布式电源的配电网潮流计算问题。各章简述如下：

第1章介绍了潮流方程的含义及圆方程的应用。本章除了对潮流方程的公式进行详细推导外，还说明了其一般可表示成圆方程的形式，给出了潮流基本方程圆图及多重解，为潮流多根解算方法奠定了基础。

第2章重点研究了电力网络方程在求解前进行前处理过程的三种方法，包括因子表法、稀疏向量法及节点编号优化法。其中节点编号优化法涵盖了传统节点编号优化方法、粒子群优化算法和蚁群算法。

第3章研究了牛顿-拉夫逊方法在潮流计算中的应用。介绍了该方法的原理、特点及局限性，并给出了具体的算例进行分析，供读者进一步体会研究。

第4章介绍了PQ分解法在潮流计算中的应用。除详细讨论基本理论、公式推导、算法流程以外，还介绍了一些新算法和改进收敛性能的措施，比较了其于N-R法、PQ分解法相比的优缺点。

第5章重点分析了带二阶项的潮流计算方法，介绍了其提出背景、数学模型、相应的改进方法及其应用，说明了带二阶项的潮流算法在故障系统和R/X比值较大的系统中，比快速解耦算法要可靠。

第6章详细介绍了直流输电系统的概念及数学模型，交直流输电系统的潮流计算方法，FACTS元件的概念和数学模型，以及具有FACTS元件的电力系统潮流计算和潮流控制，体现了现代电力电子技术对电力系统潮流问题的影响。

第7章重点讨论了含分布式电源的配电网潮流计算，介绍了现代智能电网建设的背景，传统配电网潮流计算的特点及方法，分布式电源并网的接口及其在潮流计算中的模型和方法。