

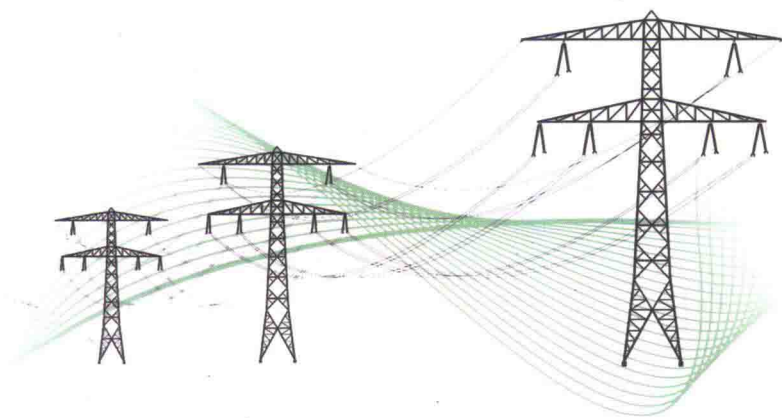


高等院校“十三五”规划教材

# 现代电力系统 稳态分析

匡洪海 李圣清 编著

XIANDAI DIANLI XITONG  
WENTAI FENXI



中南大学出版社  
www.csupress.com.cn

本书得到“湖南工业大学学位与研究生教育研究生课程教材建设项目(The Teaching Textbooks for Postgraduates Sponsored by Hunan University of Technology)”(项目编号 JC1503)的资助

# 现代电力系统稳态分析

匡洪海 李圣清 编著



中南大学出版社  
[www.csupress.com.cn](http://www.csupress.com.cn)

---

图书在版编目 ( C I P ) 数据

现代电力系统稳态分析 / 匡洪海, 李圣清编著. --长沙:  
中南大学出版社, 2017. 7  
ISBN 978 - 7 - 5487 - 2710 - 1

I. ①现… II. ①匡… ②李… III. ①电力系统稳定—系统分析  
IV. ①TM712

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 011326 号

---

现代电力系统稳态分析

匡洪海 李圣清 编著

---

责任编辑 韩 雪

责任印制 易红卫

出版发行 中南大学出版社

社址: 长沙市麓山南路

邮编: 410083

发行科电话: 0731 - 88876770

传真: 0731 - 88710482

印 装 长沙理工大印刷厂

---

开 本 787 × 1092 1/16 印张 12.75 字数 322 千字

版 次 2017 年 7 月第 1 版 2017 年 7 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 2710 - 1

定 价 38.00 元

---

图书出现印装问题, 请与经销商调换

## 作者简介

匡洪海，女，湖南双峰人，博士，教授，硕士生导师。1997年6月于长沙电力学院电力系统及其自动化专业获得学士学位；2005年6月获得华南理工大学电力系统及其自动化专业工学硕士学位；2013年10月从湖南大学电气工程专业工获得工学博士学位。以第一作者发表论文30余篇，主持和参与科研项目10余项。

## 内容简介

本书系统地介绍了现代电力系统稳态分析的网络模型、网络方程和潮流方程的建立思路以及电力潮流方程的求解。

全书分为上下两篇，共 10 章。上篇共 4 章，介绍现代电力系统稳态分析潮流模型的建立，涉及电力网络矩阵、电力网络方程、电力潮流计算数学模型的建模、电力网络的变换、化简、等值；下篇共 6 章，重点阐述潮流方程的求解计算方法、最优潮流计算、病态潮流的计算、实现潮流算法的稀疏技术、潮流计算中的自动调整控制以及交直流电力系统的潮流计算。

本书主要作为电气工程专业研究生教材，也可以作为电力专业科技人员、高等院校教师和本科高年级学生的参考书。

# 前 言

现代电力系统已经进入大系统、特/超高压、远距离、交直流混联的大区域互联的新阶段。目前我国的电力系统已基本形成大电网、大机组、高电压输电和大区域互联的格局，区域电网的互联是现代电力系统发展的一大趋势。将现有电网互联整合为东、西部两大电网，进而融合为一个同步电网，届时不仅可以解决中西部地区电力消纳的问题，也可以让东南沿海等用电集中地区的用电需求得到满足，从一定程度上限制石化能源发电的扩张。

现代电力系统发展的另一趋势是分布式发电和微电网，分布式发电和微电网的发展可以推迟对大电力系统发电容量的投资，减少备用容量，加速投资回收，节省输电线路投资，减少网损。与大电网配合可以大大提高可靠性，在大电网崩溃或地震、暴风雪、人为破坏等意外灾害引起大面积停电情况下，保持用户供电。

因此，要保证规模庞大的电力系统安全、经济地运行，就需要对现代电力系统进行稳态分析和暂态分析，以便建设一套高度信息化、自动化和可靠的调度自动化系统，实现对现代电力系统的在线计算机监控与调度决策。

“现代电力系统稳态分析”作为电气工程专业研究生的核心专业课程，既有极强的理论逻辑性，又有一定的工程实践性，在电力系统知识体系中起到了承上启下的作用。在学习该课程前需具备“高等电网络分析”“最优化计算”“非线性规划”“矩阵论”和“数值分析”等前续课程的知识。新能源和分布式发电的并入增加了现代电力系统的复杂度，尤其是大电网潮流计算时的各种潮流算法需通过计算机编程实现方面。由于该课程具有内容广、概念多、计算繁、公式推导复杂等特点，因此它一直是教、学双方的难点课程。在“湖南工业大学学位与研究生教育研究生课程教材建设项目(The Teaching Textbooks for Postgraduates Sponsored by Hunan University of Technology)”(项目编号 JC1503)的资助下，出版了与此课程教学相适应的教材。

本书分上下两篇，上篇共4章，主要介绍现代电力系统稳态分析潮流模型的建立，涉及电力网络矩阵、电力网络方程、电力潮流计算数学模型的建模、电力网络的变换、化简、等值；下篇共6章，重点阐述潮流方程的求解计算方法、最优潮流的计算、病态潮流的计算、实现潮流计算的稀疏技术、潮流计算中的自动调节控制以及交直流电力系统的潮流计算。

在本书编写的过程中，得到了湖南工业大学研究生院、湖南工业大学电气学院各位领导的支持，得到了曾进辉博士、张晓虎博士的帮助，在此对他们表示衷心的感谢，感谢汪宝、郑丽平等硕士研究生对书稿的认真校对，同时对本书所参考书目的各位作者以及电力行业的各位前辈表示感谢。

由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请读者给予批评指正。

编 者  
2017年3月

## 目 录

## 第一篇 模型的建立

第1章 绪 论 .....	(3)
1.1 现代电力系统的概述 .....	(3)
1.2 现代电力系统分析的基本特点与功能 .....	(4)
1.3 现代电力系统稳态分析的基本思路 .....	(5)
第2章 电力系统的网络分析和两大约束 .....	(7)
2.1 网络和网络拓扑分析 .....	(7)
2.1.1 网络的概念 .....	(7)
2.1.2 网络的物理模型和数学模型 .....	(7)
2.1.3 网络拓扑分析 .....	(7)
2.2 网络的约束 .....	(10)
2.2.1 元件的特性约束 .....	(10)
2.2.2 电力网络支路的特性约束 .....	(11)
2.2.3 电力网络支路方程 .....	(12)
2.3 网络的拓扑约束 .....	(13)
2.3.1 图的基本概念 .....	(13)
2.3.2 关联矩阵 .....	(14)
2.4 关联矢量与支路的数学描述 .....	(18)
2.4.1 一般无源网络 .....	(18)
2.4.2 广义无源支路 .....	(19)
第3章 电力系统网络矩阵和潮流方程 .....	(22)
3.1 节点导纳矩阵 .....	(22)
3.1.1 节点不定导纳矩阵 .....	(22)
3.1.2 节点定导纳矩阵 .....	(23)
3.1.3 节点导纳矩阵 $Y$ 的形成 .....	(24)

3.1.4	节点导纳矩阵表达式的推导 .....	(28)
3.1.5	导纳矩阵中元素的物理意义 .....	(29)
3.2	节点阻抗矩阵 .....	(35)
3.2.1	节点阻抗矩阵的物理意义 .....	(35)
3.2.2	节点阻抗矩阵的性质 .....	(37)
3.2.3	节点阻抗矩阵的形成 .....	(37)
3.2.4	节点阻抗矩阵的修正 .....	(42)
3.3	潮流计算的数学模型 .....	(43)
3.3.1	潮流计算的网路结构 .....	(43)
3.3.2	潮流方程 .....	(44)
3.3.3	节点的分类 .....	(46)
3.3.4	潮流方程的个数 .....	(47)
<b>第4章</b>	<b>电力网络变换、化简和等值 .....</b>	<b>(48)</b>
4.1	网络变换 .....	(48)
4.2	网络化简 .....	(52)
4.2.1	用导纳矩阵形式表示 .....	(52)
4.2.2	用阻抗矩阵形式表示 .....	(53)
4.3	网络等值 .....	(54)
4.4	诺顿等值和戴维南等值 .....	(58)
4.4.1	单端口网络 .....	(58)
4.4.2	多端口网络 .....	(61)
4.4.3	网络变更时诺顿等值和戴维南等值的修正 .....	(64)

## 第二篇 潮流的求解和应用

<b>第5章</b>	<b>电力系统潮流的求解方法 .....</b>	<b>(69)</b>
5.1	概述 .....	(69)
5.2	高斯-赛德尔法 .....	(72)
5.3	牛顿-拉夫逊法 .....	(76)
5.3.1	牛顿-拉夫逊法的数学描述 .....	(76)
5.3.2	潮流的牛顿-拉夫逊法 .....	(77)
5.3.3	直角坐标形式的牛顿-拉夫逊法 .....	(77)
5.3.4	极坐标形式的牛顿-拉夫逊法 .....	(79)
5.3.5	牛顿-拉夫逊法求解电力系统潮流的程序框图 .....	(81)
5.4	直流潮流法 .....	(83)
5.5	快速分解法 .....	(86)
5.6	保留非线性潮流法 .....	(92)



5.6.1	二阶潮流法	(92)
5.6.2	保留非线性潮流法	(95)
5.6.3	直角坐标形式包含二阶项的快速潮流法	(96)
<b>第6章</b>	<b>最优潮流的计算</b>	<b>(101)</b>
6.1	概 述	(101)
6.2	最优潮流的数学模型	(102)
6.2.1	最优潮流变量	(102)
6.2.2	最优潮流的目标函数	(102)
6.2.3	最优潮流的约束条件	(103)
6.2.4	最优潮流的模型	(104)
6.3	最优潮流算法	(104)
6.4	简化梯度法最优潮流	(106)
6.4.1	仅有等式约束条件时的算法	(107)
6.4.2	不等式约束条件的处理	(109)
6.4.3	简化梯度最优潮流算法	(110)
6.4.4	简化梯度最优潮流算法的性能分析及原理图	(110)
6.5	最优潮流的牛顿算法	(111)
6.5.1	牛顿法的基本原理	(112)
6.5.2	最优潮流牛顿算法	(112)
6.6	有功、无功交叉逼近最优潮流	(116)
6.6.1	有功、无功交叉逼近法最优潮流算法列式	(116)
6.6.2	有功、无功交叉逼近最优潮流算法特点分析	(117)
6.7	最优潮流的内点法	(118)
6.7.1	内点法的基本原理	(118)
6.7.2	最优潮流内点法的流程图	(121)
6.8	基于电力市场环境下的最优潮流计算	(122)
6.8.1	实时电价计算及其辅助服务定价	(123)
6.8.2	基于最优潮流的阻塞管理方法	(124)
6.8.3	输电系统可用传输容量 ATC 的计算	(126)
6.8.4	输电费用的确定	(127)
<b>第7章</b>	<b>病态潮流的计算</b>	<b>(129)</b>
7.1	最优乘法子法	(130)
7.2	连续潮流法	(133)
7.2.1	连续潮流法的基本思路	(133)
7.2.2	连续潮流法的计算	(134)

<b>第 8 章 实现潮流算法的稀疏技术</b> .....	(140)
8.1 概 述 .....	(140)
8.2 稀疏技术 .....	(141)
8.2.1 稀疏矩阵和稀疏矢量的存储方法 .....	(141)
8.2.2 稀疏矩阵的因子分解 .....	(146)
8.3 稀疏矩阵技术的图论描述 .....	(152)
8.3.1 基本概念 .....	(152)
8.3.2 图上因子分解 .....	(155)
8.4 图上前代和回代 .....	(158)
8.5 稀疏矢量技术 .....	(161)
8.6 节点优化编号顺序的优先 .....	(163)
<b>第 9 章 潮流计算中的自动调整控制</b> .....	(167)
9.1 负荷的电压静态特性 .....	(167)
9.1.1 把负荷功率看做节点电压的线性函数 .....	(167)
9.1.2 把负荷功率看做节点电压的二次函数 .....	(168)
9.2 节点类型转换和多 $V\theta$ 节点计算 .....	(168)
9.2.1 $PV$ 转为 $PQ$ : 发电机节点无功越界 .....	(169)
9.2.2 $PQ$ 节点转换成 $PV$ 节点: 负荷节点电压越界 .....	(170)
9.2.3 多 $V\theta$ 节点时的潮流计算 .....	(172)
9.2.4 带负荷调节变压器抽头的调整 .....	(173)
9.3 中枢点电压和联络线功率控制 .....	(175)
9.3.1 中枢点电压的控制 .....	(175)
9.3.2 联络线功率的控制 .....	(176)
9.4 潮流方程解的存在性 .....	(178)
<b>第 10 章 交直流电力系统的潮流计算</b> .....	(181)
10.1 概 述 .....	(181)
10.2 交直流电力系统潮流计算的数学模型 .....	(182)
10.3 直流电力系统模型 .....	(183)
10.3.1 直流系统标么制 .....	(183)
10.3.2 直流电力系统方程式 .....	(183)
10.4 交直流电力系统潮流算法 .....	(186)
10.4.1 联合求解法 .....	(186)
10.4.2 交替求解法 .....	(188)
<b>参考文献</b> .....	(192)

# 第一篇 模型的建立



# 第1章 绪论

## 1.1 现代电力系统的概述

现代电力系统已经进入大系统、特/超高压、远距离、交直流混联的大区域互联的新阶段。社会经济的发展促使现代电力系统的经营和管理都发生了重大变革，电力市场将改变传统的经营方式。随着科学技术的不断进步，新能源的利用使电力系统中的发电形式也呈现出多样化的局面。随着计算机和自动化技术的不断发展，现代电力系统正成为高度集成的电力系统综合自动化系统。

因此，现代电力系统可看成是由三个基本系统组成，一是电能生产、传输、使用的一次系统，即发电、输电、变电、配电、用电这五部分组成的一次系统，称为物流系统；二是电力系统的监控、保护、自动控制和调度自动化等组成的能量管理系统，称为信息流系统；三是电能量的交易系统，称为货币流系统。其中，物流系统的研究侧重于能量的转化、电能的输送和分配以及电力系统可靠、稳定、安全、经济运行的规律；信息流系统主要研究如何获得物流系统的各种状态信息以及对所得信息的传输、处理和应用；货币流系统主要研究在市场环境下有关电能这种商品的经济性行为。

我国的电力系统已基本形成大电网、大机组、高电压输电和大区域互联的格局。东北电网、华北电网、华中电网、华东电网、西北电网和南方电网已实现互联，形成了全国统一电网。按照国家电网的规划部署，我国现有电网格局将实现重大变化，华北、华中、华东、东北、西北等交流同步电网，到2020年将互联整合为东部、西部两大电网；到2025年，东、西部电网则通过同步互联工程，形成一个同步电网。

区域电网的互联是现代电力系统发展的一大趋势，将现有电网互联整合为东、西部两大电网，进而融合为一个同步电网，届时不仅可以解决中西部地区电力消纳的问题，也可以让东南沿海等用电集中地区的用电需求得到满足，从而在一定程度上限制石化能源发电的扩张。

推进清洁替代、电能替代正成为全球能源互联网的战略方向。让清洁能源转化为电能，通过特高压电网、智能电网，实现全国、洲内乃至洲际互联互通。国家电网通过重塑东、西部两大电网，并在2025年将其融合为一个同步电网，实际上就是在构建全国能源互联网。

现代电力系统发展的另一趋势是分布式发电和微电网，分布式发电和微电网的发展可以推迟大电力系统发电容量的投资，减少备用容量，加速投资回收，节省输电线路投资，减少

网损。与大电网配合可以大大提高可靠性，在大电网崩溃或地震、暴风雪、人为破坏等意外灾害引起大面积停电的情况下，仍可保持为用户供电。

## 1.2 现代电力系统分析的基本特点与功能

现代电力系统的主要特点是规模庞大，系统网络节点数量多，系统覆盖地域广；电力网络结构复杂，因此其拓扑结构复杂，系统参数变化点多；是交直流混合的系统；影响面宽，通常会从影响一个地区、一个省、一个国家扩展到影响多个国家。

地理分布广阔、规模巨大的现代电力系统，在经济性和稳定性方面具有显著优势，但同时也带来诸多弊端。因为电能的生产、传输、分配和消费是同时进行的，不能大量储存，一处的故障可能会引起并波及整个系统的连锁事故。比如 2003 年北美的“8·14 美加大停电”，“9·23”瑞典-丹麦大停电，“9·28”意大利大停电以及 2006 年“11·4”西欧大停电，都是在大型互联网中发生单重故障引起系统连锁事故进而导致系统最终崩溃，造成大面积长时间的停电。

因此，要保证规模庞大的电力系统安全经济地运行，就需要对现代电力系统进行稳态分析和暂态分析，以便建设一套高度信息化、自动化和可靠的调度自动化系统，实现对现代电力系统的在线计算机监控与调度决策。调度自动化系统实施监视电力系统各部分的电压、潮流、频率和部分相角，并通过各种调节手段和装置自动或手动地连续调节有功电源或无功电源，或通过电力网络结构的变化和负荷的切换来保证供电质量。

现代电力系统分析包含稳态分析和暂态分析。本书主要涉及电力系统稳态分析的内容，重点阐述电力网络矩阵、电力网络方程、潮流模型的建立和潮流方程的求解方法、实现技术及应用。利用计算机技术，通过软件编程以实现对现代电力系统的仿真计算分析。

现代电力系统分析通常是通过仿真计算来实现的。现代电力系统仿真计算涉及的主要问题有：

- ① 确定电力系统的数学模型，也就是进行数学建模。
- ② 设计模型的求解计算方法，也就是求解数学模型的可能算法。
- ③ 进行程序设计，通过编程，将所采用的各种算法通过程序来实现。

电力系统仿真的过程为：针对电力系统的实际系统，首先建立数学模型，接着对其数学模型寻求求解的计算算法，然后利用计算机技术进行编程，最后通过计算对仿真结果进行分析。

电力系统仿真计算的基本内容有潮流计算、短路计算、稳定计算。

电力系统建模的主要任务包括元件建模和网络建模。其中元件建模是指同步发电机、电力负荷、直流系统及 FACTS 的建模；网络建模是指线路、变压器及其拓扑网络的建模。

本书主要针对电力网络来进行研究分析，电力网络的数学模型是现代电力系统分析的基础。在正常情况下进行电力潮流和优化潮流分析；在故障情况下进行短路电流以及电力系统静态安全分析和动态稳定性的评估。这两者都离不开电力网络的数学模型，其中电力系统静态安全分析是指事故后稳定运行状况的安全性，动态稳定性是指扰动消失后能否恢复到原来的平衡状态。

### 1.3 现代电力系统稳态分析的基本思路

下面对本书所涉及的内容做一个简单的介绍。

电力系统中发电机发出的功率被输送到电力网络，再由电力网络输出功率给用户，以满足用户负荷的需要。根据功率平衡的条件，当电源注入电网的功率与电网输出给用户的功率相等时，电力网络没有功率损耗；当电源注入电网的功率与电网输出给用户的功率不相等时，电力网络存在功率损耗。

电力网络分析是电力系统分析的关键环节，不管是研究稳态过程还是暂态过程，对电力网络的分析和处理都是其主要内容，而电力网络主要是由变压器和传输线组成，因变压器和传输线的暂态过程非常短暂，为突出电力网络这一主题，本书只涉及稳态，不涉及暂态，只涉及代数方程，而不涉及微分方程。因为暂态稳定分析时就会涉及微分方程，会使研究分析变得复杂。暂态过程可用微分方程表示：

$$\dot{x} = f(x, \alpha) = 0 \quad (1.1)$$

式中： $x$  表示状态量，比如系统中的  $U, \theta$ ； $\alpha$  表示参数，比如节点处注入的  $P, Q, I$ 。

在电力系统正常运行的情况下，通常需要对电力网络中的潮流进行分析，为此需要对电力网络的构成、元件及元件之间的连接进行分析，电力网络运行性能受到元件特性的约束和连接关系的约束，而这种约束可以扩充到电力系统，因此可认为电力系统运行性能除了元件约束、连接关系约束外，还有许多其他约束，比如功率平衡约束、变量范围约束、发电机出力约束、安全要求约束、经济性运行要求约束等。因此可以认为电力系统运行是各种约束作用下的结果。

从电路的角度看，每一个元件都能把施加于该元件上的电压和流过该元件的电流联系起来，这种特性通常可以用参数  $R, L, C$  表示。电力网络中的电流、电压等要满足 KCL 和 KVL 定律，这是建立电力网络数学模型的基础。

电力网络模型的特点是线路、变压器在稳态运行条件下是线性（且定常）元件，其元件模型等值电路简单，所以网络本身是线性系统。

电力网络模型（网络矩阵）主要有对应节点导纳方程的节点导纳矩阵、对应节点阻抗方程的节点阻抗矩阵、对应回路电流方程的回路阻抗矩阵，而电力网络则通常采用节点导纳矩阵或节点阻抗矩阵来描述。

对于有  $n$  个独立节点的电力网络，可以根据 KCL 列出其节点网络方程

$$\dot{\mathbf{I}} = \mathbf{Y} \dot{\mathbf{U}} \quad (1.2)$$

式中： $\dot{\mathbf{I}} = [\dot{I}_1 \ \dot{I}_2 \ \dots \ \dot{I}_n]^T$ ，为节点注入电流列向量； $\dot{\mathbf{U}} = [\dot{U}_1 \ \dot{U}_2 \ \dots \ \dot{U}_n]^T$ ，为节点电压列向量； $\mathbf{Y}$  为电力网络的节点导纳矩阵。

电力系统的网络数学模型通常采用网络方程来描述，常见网络方程有节点方程、回路方程和割集方程。

在实际电力系统中，通常给定的参数是功率，而不是电流，因此常需要用注入功率来代

替注入电流, 对于某一节点  $i$ , 则有  $\dot{\mathbf{I}} = \left( \frac{\dot{\mathbf{S}}^*}{\dot{\mathbf{U}}^*} \right)$ , 因此式(1.2)可改写为

$$\left( \frac{\dot{\mathbf{S}}}{\dot{\mathbf{U}}} \right)^* = \mathbf{Y} \dot{\mathbf{U}} \quad (1.3)$$

式(1.3)中的电压和功率均为列向量, 将其展开, 则有

$$\frac{P_i - jQ_i}{\dot{U}_i^*} = \sum_{j=1}^n Y_{ij} \dot{U}_j \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1.4)$$

式(1.4)是电力系统运行中的功率平衡方程式, 而潮流计算就是求解上述方程, 为此我们通常用直角坐标下的潮流方程或极坐标下的潮流方程来表示。

由于现代电力系统规模庞大、结构复杂, 因此在进行电网计算时, 需要进行网络的变换、化简、等值以及大规模网络的分块计算。

由于式(1.4)的非线性, 因此解潮流方程也就有了各种各样的计算算法。衡量各种潮流计算算法优劣的主要指标有计算收敛性、计算速度、计算稳定性、计算复杂性。

通常求解潮流方程的方法分为基本潮流解法和特殊潮流解法, 其中基本潮流解法包括高斯-塞德尔法、牛顿-拉夫逊法、快速分解法。这三种基本算法在大学本科的《电力系统分析稳态分析》中已经介绍过, 但鉴于这些方法的重要性, 本书将在本科教材的基础上作进一步的讨论。

有了潮流求解方法, 在实际应用中还需要利用计算机技术进行编程, 因此需要掌握计算机技术中有关存储、稀疏技术等。

关于潮流计算中的特殊问题, 如潮流方程  $f(x, \alpha) = 0$  是否有解, 有几个解, 对于病态潮流怎样求解, 在书中会作详细的介绍。

归纳起来, 电力网络分析的基本步骤如下:

- ①建立电力网络元件的数学模型。
- ②建立电力网络的数学模型。
- ③选择合理的数值计算方法。
- ④电力网络问题的计算机求解。



## 第2章 电力系统的网络分析和两大约束

### 2.1 网络和网络拓扑分析

#### 2.1.1 网络的概念

网络是指把若干元件有目的、按照一定的形式连接起来,完成特定功能的总体。

不论是电力系统的电力传输或电能转换,还是电子技术、通信技术、计算机技术或控制技术中的信号传输与变换处理等,都离不开网络,这些网络称为电网络,从本质上讲,都是电路,是具有特定功能和构成该系统的极其重要的组成部分。

电力网络是指把输配电线路、变压器和移相器、开关、串联和并联电容器、串联和并联电抗器等电气元件,按一定的形式连接成的一个整体,并以完成电能输送和分配为目的。从本质上说,电力网络属于电网络,也是由实际电路抽象出来的物理模型。

#### 2.1.2 网络的物理模型和数学模型

物理模型是建立在分析现象与机理认识基础上的模型,把实际的问题,通过相关的物理定律概括和抽象出来并满足实际情况的物理表征,常以实物或图画形式直观地表达认识对象的特征。

数学模型是指将现实问题归结为相应的数学问题,并在此基础上利用数学的概念、方法和理论进行深入的分析,从而从定性或定量的角度来刻画实际问题,并为解决现实问题提供精确的数据或可靠的指导。换句话说,数学模型就是把实际问题抽象成数学问题,并分析解答。

通常根据研究的目的是和内容,可以利用物理模型进行物理试验;根据计算手段和工具,可以利用数学模型进行数学仿真,元件的数学模型可以通过试验的方法得到所需要的参数,网络的数学模型可以通过程序确定网络拓扑关系。

#### 2.1.3 网络拓扑分析

本书的拓扑分析就是指电力网络接线分析,开关设备是拓扑分析中最主要的电网设备,它的状态改变将改变网络的结构和拓扑分析后的电网模型。

电力网络拓扑分析的功能是根据电网的开关状态,分析判断出电网的结构(即拓扑),也