

XIANDAI DIANLI XITONG  
WENTAI YU ZANTAI FENXI FANGFA TANJIU

# 现代电力系统 稳态与暂态分析方法探究

臧家义 著



国家一级出版社  中国纺织出版社 全国百佳图书出版单位

# 现代电力系统

## 稳态与暂态分析方法探究

臧家义 著

## 内 容 提 要

本书重点阐述了电力系统分析涉及的元件模型和计算机分析方法,主要内容包括绪论、电力系统的潮流计算、电力系统的有功功率平衡和频率调整、电力系统的无功功率平衡和电压调整、电力系统对称故障的分析计算、电力系统不对称故障的分析计算等。本书结构合理,条理清晰,内容丰富,是一本值得学习研究的著作。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代电力系统稳态与暂态分析方法探究/臧家义著

. --北京:中国纺织出版社,2019.1

ISBN 978-7-5180-2017-1

I. ①现… II. ①臧… 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(2015)第 229907 号

---

责任编辑:姚 君 责任印制:储志伟

---

中国纺织出版社出版发行

地址:北京市朝阳区百子湾东里 A407 号楼 邮政编码:100124

销售电话:010-67004422 传真:010-87155801

<http://www.c-textilep.com>

E-mail: [faxing@c-textilep.com](mailto:faxing@c-textilep.com)

中国纺织出版社天猫旗舰店

官方微博 <http://www.weibo.com/2119887771>

北京虎彩文化传播有限公司印制 各地新华书店经销

2019 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

开本:710×1000 1/16 印张:15.5

字数:226 千字 定价:71.00 元

---

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社图书营销中心调换

# 前 言

电能是现代社会的主要能源,在国民经济和人民生活起着极其重要的作用。电能具有如下优点:

- ①使用方便。
- ②易于有效而精确控制。
- ③传输效率高。
- ④易于分配和输送。
- ⑤以电能代替其他能源,可以提高能源的利用效率。

发电厂内的发电机把某种一次能源转换成电能,电能经过变压器和不同电压等级的电力线路输送并分配到用户,再通过各种用电设备转换成机械能、热能、光能和化学能等。这些生产、变换、输送、分配和消耗电能的设备连接在一起组成的统一整体称为电力系统。

电力系统的运行状态分为稳态和暂态两大类。

何为稳态和暂态?

所谓的稳态即系统参数保持不变时,描述电力系统运行状态的运行参量亦为常数。暂态即系统运行参量的大小由参数决定,当系统参数变化后,运行参量就从原来的一组数值变为一组新的数值,即电力系统从一种状态变为另一种稳定的运行状态。

暂态可以分为如下三类:

{波过程  
电磁暂态过程  
机电暂态过程

本书主要研究对象是现代电力系统稳态与暂态,撰写特点如下:

- ①突出方法分析探究。
- ②吐故纳新。
- ③配有丰富的应用案例。
- ④尽量减少繁琐公式的推导。
- ⑤注重讲解研究问题的思路及解决问题的方法。

本书共分为6章,主要内容包括绪论、电力系统的潮流计算、电力系统的有功功率平衡和频率调整、电力系统的无功功率平衡和电压调整、电力系

统对称故障的分析计算、电力系统不对称故障的分析计算等。

本书在撰写过程中参考了大量有价值的文献与资料,吸取了许多人的宝贵经验,在此向这些文献的作者表示敬意。此外,本书的撰写还得到了中国纺织出版社领导和编辑的鼎力支持和帮助,同时也得到了各学校领导的支持和鼓励,在此一并表示感谢。

由于本人水平有限,经验不足,加之时间仓促,书中难免存在错漏和不妥之处,竭诚希望各同行专家以及广大读者提出宝贵的意见和建议,以使本书不断完善。

臧家义  
齐鲁工业大学  
2018年1月

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	(1)
1.1 电力系统概述 .....	(1)
1.2 电力系统的接线方式 .....	(5)
第 2 章 电力系统的潮流计算 .....	(8)
2.1 开式电力网的潮流计算 .....	(8)
2.2 N-R 法潮流计算 .....	(14)
2.3 P-Q 分解法潮流计算 .....	(22)
2.4 交直流混合电力系统潮流计算 .....	(25)
2.5 潮流计算中稀疏技术的运用 .....	(29)
2.6 电力系统最优潮流 .....	(39)
第 3 章 电力系统的有功功率平衡和频率调整 .....	(55)
3.1 电力系统的有功功率平衡 .....	(55)
3.2 电力系统有功功率的最优分配 .....	(59)
3.3 电力系统的频率特性 .....	(78)
3.4 电力系统的频率调整 .....	(85)
第 4 章 电力系统的无功功率平衡和电压调整 .....	(97)
4.1 电力系统的无功功率平衡 .....	(97)
4.2 电压管理与电压调整 .....	(104)
第 5 章 电力系统对称故障的分析计算 .....	(136)
5.1 短路的基本概念 .....	(136)
5.2 网络的变换与化简 .....	(138)
5.3 无限大容量电源供电的三相短路分析计算 .....	(141)
5.4 同步发电机突然三相短路分析计算 .....	(148)
5.5 电力系统三相短路的实用计算 .....	(164)

<b>第 6 章 电力系统不对称故障的分析计算</b> .....	(177)
6.1 对称分量法及其应用 .....	(177)
6.2 电力系统各元件的序阻抗和等效电路 .....	(182)
6.3 电力系统各序网络的制定 .....	(194)
6.4 简单不对称短路的分析和计算 .....	(200)
6.5 非全相运行的分析计算 .....	(221)
6.6 不对称短路时运算曲线的应用 .....	(231)
<b>参考文献</b> .....	(239)

# 第 1 章 绪论

电力工业是国民经济及社会发展的支柱产业,在国民经济中占有重要地位,它的发展是社会进步和物质文化及生活现代化的根本需要。

## 1.1 电力系统概述

### 1.1.1 电力系统的基本参数和结线图

现代电力系统中各主要环节相互间的联系如图 1-1 所示。

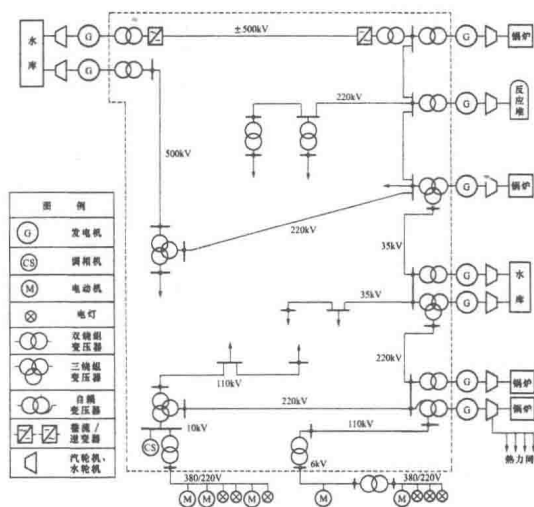


图 1-1 电力系统和电力网络示意图

其中,锅炉和反应堆分别将化学能和核能转化为热能,汽轮机又将后者转化为机械能,水轮机则直接将水能转化为机械能。发电机将机械能转化为电能,而变压器和电力线路则变换、输送、分配电能,电动机、电热电炉、电



灯等消耗电能。在这些设备中,电能又分别转化为机械能、热能、光能,等等。

在电力系统中,由变压器、电力线路等变换、输送、分配电能设备所组成的部分称电力网络,即图 1-1 中虚线所框出的部分。

电力系统可以用一些基本参数加以描述,分别简述如下。

### (1)总装机容量

电力系统的总装机容量是指该系统中实际安装的发电机组额定有功功率的总和,以千瓦(kW)、兆瓦(MW)、吉瓦(GW)计。

### (2)年发电量

电力系统的年发电量是指该系统中所有发电机组全年实际发出电能的总和,以兆瓦时(MW·h)、吉瓦时(GW·h)、太瓦时(TW·h)计。

### (3)最大负荷

最大负荷是指规定时间内电力系统总有功功率负荷的最大值,以 kW、MW、GW 计。

### (4)年用电量

年用电量是指接在系统上所有用户全年所用电能的总和,以 MW·h 计。

### (5)额定频率

按国家标准规定,我国所有交流电力系统的额定频率均为 50 赫兹(Hz)。国外则有额定频率为 60Hz 或 25Hz 的电力系统。

### (6)最高电压

是指电力系统中最高电压等级电力线路的额定电压,以千伏(kV)计。

### (7)地理结线图

电力系统的地理结线图主要显示该系统中发电厂、变电所的地理位置,电力线路的路径,以及它们相互间的联结。华东电力系统的地理结线图如图 1-2 所示。

### (8)电气结线图

电力系统的电气结线图主要显示该系统中发电机、变压器、母线、断路器、电力线路等主要电机、电器、线路之间的电气结线。图 1-1 中,表示发电机、变压器、母线、电力线路相互联结的部分实际上就是一种简化的电气结线图。

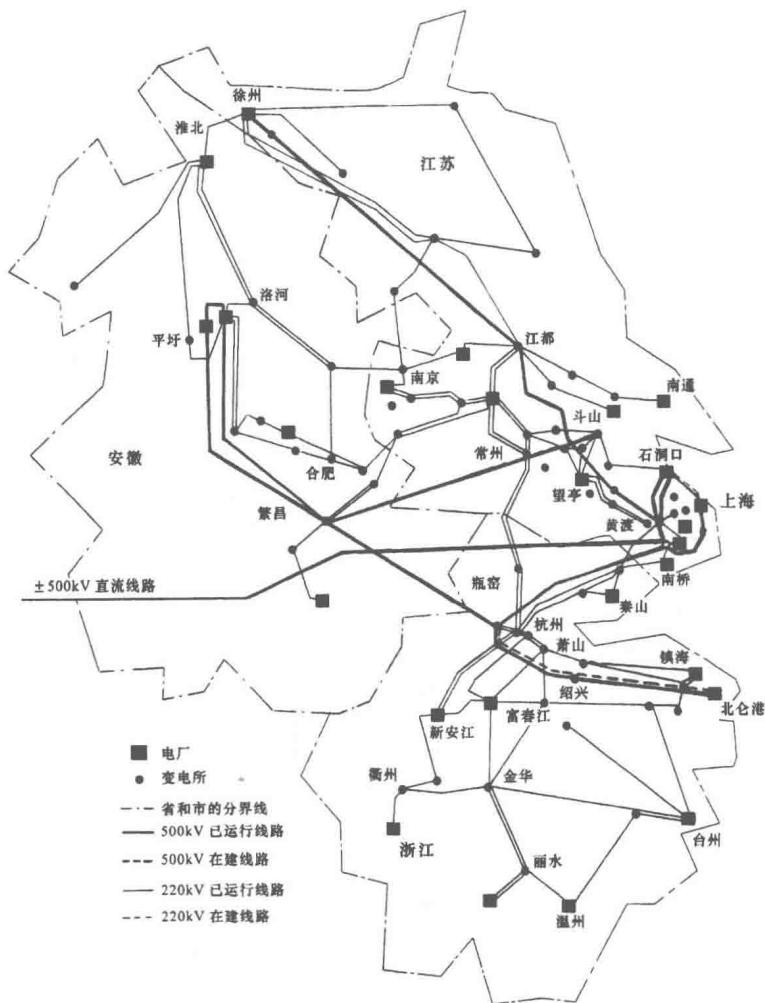


图 1-2 华东电力系统地理结线图

## 1.1.2 现代电力系统运行的特点和要求

### 1.1.2.1 现代电力系统运行的特点

电能的优点是输送和控制相对容易,效率和可靠性高。电能的生产、输送、分配和使用与其他工业产品相比有着明显不同的特点,其主要特点如下。

①同时性。

- ②整体性。
- ③快速性。
- ④连续性。
- ⑤实时性。
- ⑥随机性。

### 1.1.2.2 现代电力系统运行的要求

- ①系统必须能够适应不断变化的负荷有功和无功功率需求。
- ②系统供电质量必须满足规定,即电压、频率在规定范围内,且具有(维持)一定的系统安全水平和供电可靠性。
- ③由于快速性要求,电力系统的正常操作,如发电机、变压器、线路、用电设备的投入或退出,都应在瞬间完成,有些操作和故障的处理必须满足系统实时控制的要求。
- ④最低成本供电。
- ⑤电力系统运行和控制必须满足在发电、输电和供电分别独立经营的条件下,保持电网的安全稳定运行水平。
- ⑥电网互联。

### 1.1.3 现代电力系统的控制

现代电力系统的控制主要包括发电控制、输电控制、调度控制和信息系统,如图 1-3 所示。

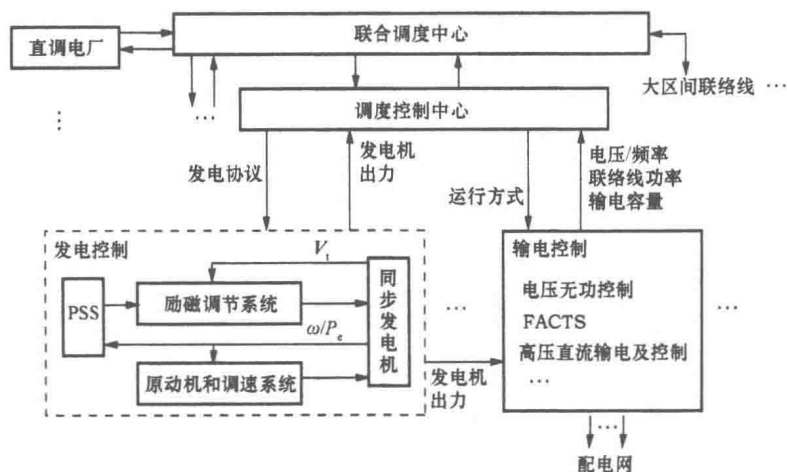


图 1-3 现代电力系统控制示意图

### (1) 发电控制

发电控制由励磁调节系统和原动机调速系统组成,根据发电协议和机组优化方案控制发电机组输出的有功功率。其中,励磁调节系统控制发电机端电压和无功功率输出;原动机调速系统控制传动同步发电机的机械能(同步发电机输入机械能)的大小,从而控制发电机组输出的有功功率。系统发电控制的首要任务是维持整个系统的发电与系统负荷和损耗的平衡,从而保证发电协议的执行,且维持系统频率及联络线潮流(与相邻系统的交换功率)在允许范围内。同时发电控制对调控整个系统的运行状态起着至关重要的作用。

### (2) 输电控制

输电控制包括功率和电压控制设备,例如静止无功补偿器、同步调相机、串/并联电容器和电抗器、有载调压变压器、移相变压器,以及柔性交流输电(FACTS)和高压直流输电控制等。柔性交流输电技术利用大功率电力电子元器件构成的装置来控制或调节交流电力系统,从而达到控制系统的目的。其优点突出表现在:在不改变现有电网结构的情况下,可以极大地提高电网的输电能力;提高系统的可靠性、快速性和灵活性;扩大系统对电压和潮流的控制能力;有很强的限制短路电流、阻尼振荡的能力,能有效提高系统暂态稳定性;对系统的参数既可断续调节又可连续调节。

### (3) 调度控制和信息系统

电网调度自动化系统是确保电网安全、优质、经济地发供电,提高电网调度运行管理水平的重要手段,是电力生产自动化和管理现代化的重要基础。随着电力工业技术的发展,规模扩大和网络互联、FACTS 的大量应用,各种发电体制的加入以及营运体制的改革,电网的运行和控制越来越依赖于完善、先进和实用的调度自动化系统以及先进的信息网络和完善的通信手段。现代电网调度自动化系统的内涵也在不断丰富、发展,不仅包括能量管理系统(EMS)、配网管理系统(DMS)、水调自动化系统等,还将包括电力市场技术支持系统、电力信息 MIS、变电站自动化、数字化变电站、互联网等现代化手段和技术的支撑。

## 1.2 电力系统的接线方式

为保证向用户安全、优质和经济地供电,电力系统的接线方式具有非常重要的作用。电力系统的接线方式通常分为无备用和有备用两类。无备用接线的电网也称为开式网络,这类网络中的每一个负荷只能靠一条线路取

得电能。单回路放射式、干线式、链式和“T接”(或树枝)式网络都属于无备用接线方式,如图 1-4 所示。

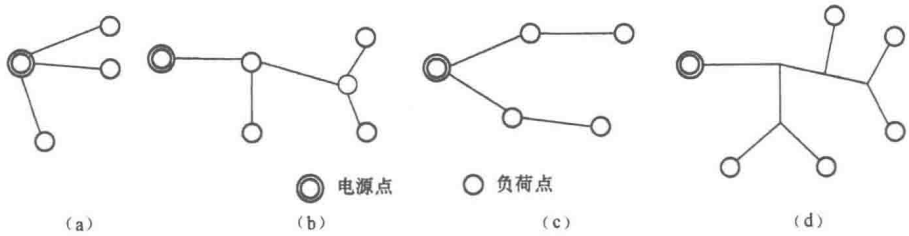


图 1-4 无备用接线方式

(a)放射式;(b)干线式;(c)链式;(d)“T接”式

有备用接线的电网也称为闭式网络,这类电网中的每一个负荷至少要有两条电源线路供电,这样可以满足“N-1”准则。在有备用接线方式中,最简单的方式是在上述无备用接线电网的每一段线路上都采用双回路,如图 1-5(a)~(d)所示,这些接线同样具有简单和运行方便的特点,而且供电可靠性和电压质量都有明显提高,其缺点是设备费用增加很多。由一个电源点和一个或几个负荷点通过线路连接而成的环形网络是最常见的有备用网络,如图 1-5(e)所示,其供电可靠性较高,也比较经济,但运行调度比较复杂,开环运行时,可能会有线段过负荷,负荷节点电压也明显降低。此外,两端供电网属于另一种常见的有备用接线方式,如图 1-5(f)所示,其供电可靠性相当于有两个电源的环形网络。

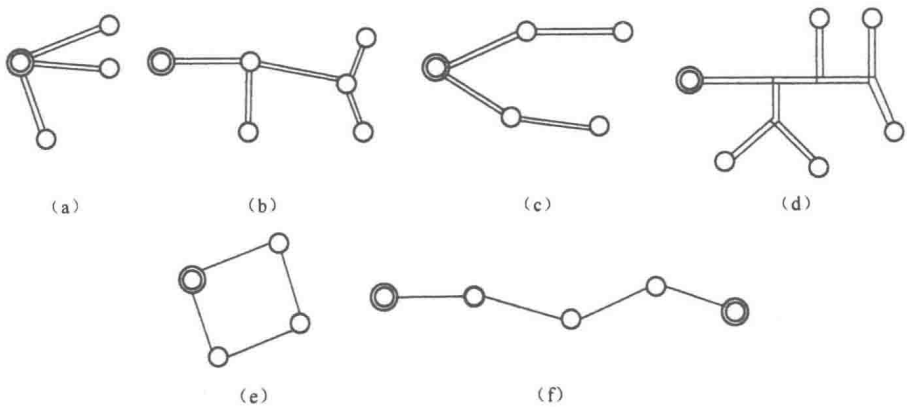


图 1-5 有备用接线方式

(a)放射式;(b)干线式;(c)链式;(d)“双 T 接”式;(e)环式;(f)两端供电式

实际电力系统的接线比较复杂,往往由各种不同接线方式的网络组成,部分有备用接线方式的示例如图 1-6 所示。

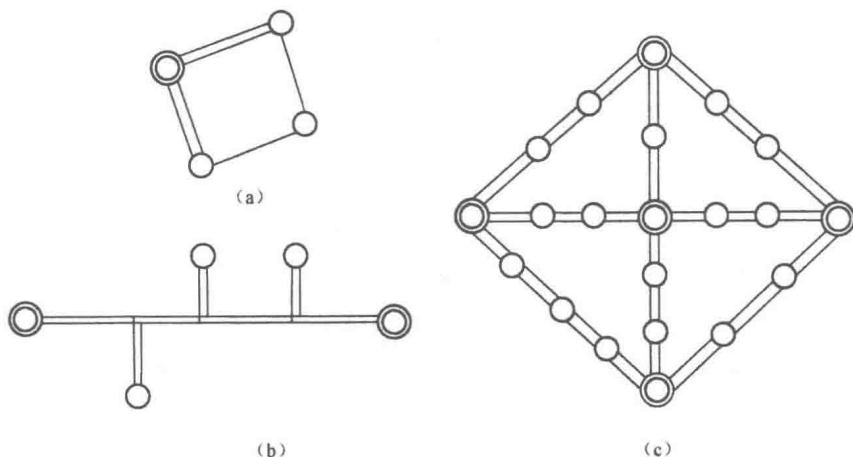


图 1-6 有备用接线方式扩展示例

(a)不完全双环式;(b)“双 T 接”两端供电式;(c)多网孔混合式

在中压配电网中,有些接线方式是闭式网络结构、开式运行,例如在图 1-7 所示的“手拉手”接线方式中,正常运行时分段开关闭合、联络开关断开,当一回线路发生故障停运时,通过开关操作实现非故障段不停电、运行设备不过载等要求。

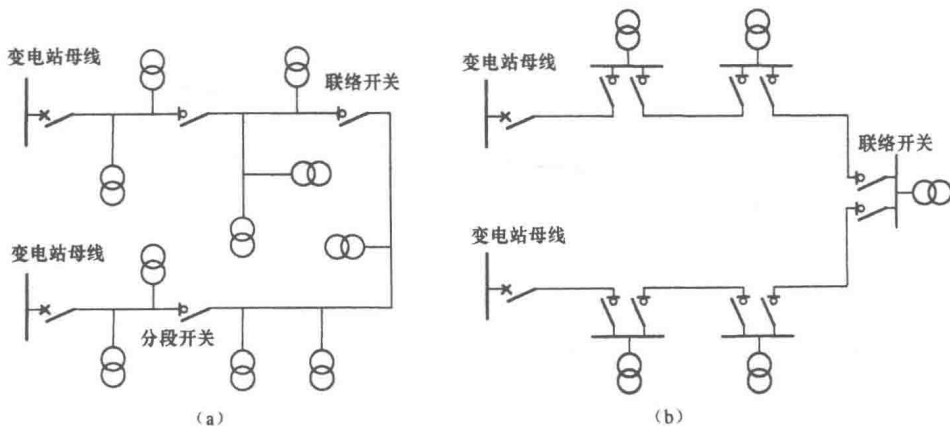


图 1-7 中压配电网“手拉手”接线方式

(a)架空线接线;(b)电缆接线

## 第 2 章 电力系统的潮流计算

随着电力系统的不断扩大、电网结构的日益复杂,已经不能再用简单的方法来计算复杂电力系统的潮流分布。目前电子计算机技术已经得到迅速发展和普及,计算机已成为分析计算复杂电力系统各种运行情况的主要工具,并广泛应用于电力系统的潮流计算。本章将介绍几种常规潮流和最优潮流的计算迭代算法,主要阐述其数学模型和计算方法。

### 2.1 开式电力网的潮流计算

#### 2.1.1 已知首端电压和末端功率的开式电力网潮流计算

求解已知首端电压和末端功率潮流计算问题的思路是,将该问题转化成已知同侧电压和功率的潮流计算问题。可以先假设所有未知的节点电压均为额定电压,首先从线路末端开始,按照已知末端电压和末端功率潮流计算的方法,逆着功率传输的方向逐段向前计算功率损耗和功率分布,直至线路首端。然后利用已知的首端电压和计算得到的首端功率,从线路首端开始,按照已知首端电压和首端功率的潮流计算方法,顺着功率传输的方向逐段向后计算,得到各节点的电压。为了提高精度,可以反复进行几次计算,直到达到满意的精度为止。这就是所谓开式配电网潮流计算的“前推回代法”。

在图 2-1(a)所示的电力系统中,供电点 A 经输电线向负荷节点 B、C 和 D 供电,供电点 A 的电压和各负荷节点的功率均已知。其等值电路见图 2-1(b)、(c)。

针对图 2-1,已知首端电压和末端功率的开式网潮流计算步骤如下。

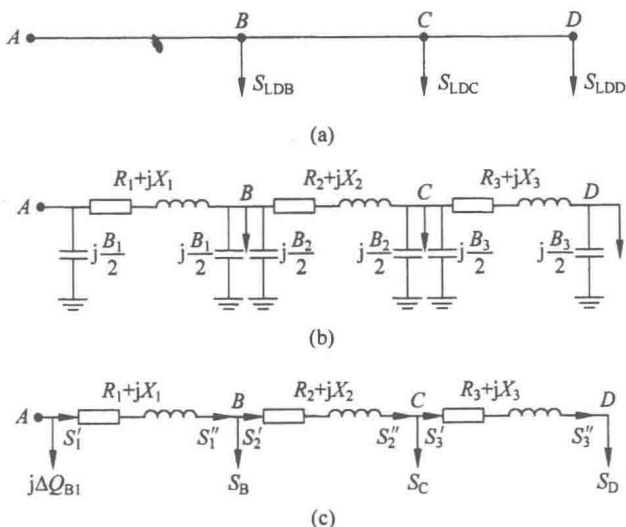


图 2-1 开式电力系统及其等值电路

① 假设各节点电压均为线路额定电压, 从离电源点最远的节点  $D$  开始, 逆着功率传输的方向依次算出各段线路阻抗中的功率损耗和功率分布。对于第三段线路

$$S''_3 = S_D, \Delta S_{L3} = \frac{P_3^2 + Q_3^2}{V_N^2} (R_3 + jX_3), S'_3 = S''_3 + \Delta S_{L3}$$

对于第二段线路

$$S''_2 = S_C + S'_3, \Delta S_{L2} = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_N^2} (R_2 + jX_2), S'_2 = S''_2 + \Delta S_{L2}$$

同样可以算出第一段线路的功率  $S'_1$ 。

② 利用第一步求得的功率  $S'_1$  和给定的首端电压  $V_A$ , 从电源点开始, 顺着功率传输的方向, 依次计算各段的电压降落, 求得各点电压。先计算  $V_B$

$$\Delta V_{AB} = \frac{P'_1 R_1 + Q'_1 X_1}{V_A}, \delta \Delta V_{AB} = \frac{P'_1 X_1 - Q'_1 R_1}{V_A}$$

$$V_B = \sqrt{(V_A - \Delta V_{AB})^2 + (\delta \Delta V_{AB})^2}$$

接着用  $V_B$  和  $S'_2$  计算  $V_C$ , 最后用  $V_C$  和  $S'_3$  计算  $V_D$ 。

通过以上两个步骤便完成了第一轮的计算, 为了提高精度, 可以重复以上的步骤, 在重复计算中应注意计算功率损耗时可以利用上一轮第二步所求得的节点电压。

上述计算方法也适用于由一个供电点通过辐射状网络向任意多个负荷



节点供电的情况。辐射状网络也称树状网络,如图 2-2 所示,其中 A 是供电点,节点 B、C 和 F 为非叶节点,节点 D、H、G 和 E 为叶节点。

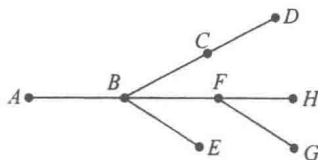


图 2-2 辐射状网络

对前述的计算步骤总结如下。

第一步,从叶节点连接的支路开始,该支路的末端功率即为叶节点功率,利用这个功率和对应的节点电压计算支路的功率损耗,求得支路的首端功率。

$$S_{ij}^{(k)} = S_j^{(k)} + \sum_{m \in N_j} S_{jm}^{(k)} \quad (2-1)$$

$$\Delta S_{ij}^{(k)} = \frac{P_{ij}^{(k)2} + Q_{ij}^{(k)2}}{V_j^{(k)2}} (r_{ij} + jx_{ij}) \quad (2-2)$$

$$S_{ij}^{(k)} = S_{ij}^{(k)} + \Delta S_{ij}^{(k)} \quad (2-3)$$

式中,  $N_j$  为以  $j$  为始节点的支路的终节点集。

第二步,利用第一步得到的首端功率和已知的首端电压,从供电点开始逐条支路进行计算,求得各支路终节点的电压。计算公式为

$$V_j^{(k+1)} = \sqrt{V_i^{(k+1)} - \left( \frac{P_{ij}^{(k)} r_{ij} + Q_{ij}^{(k)} x_{ij}}{V_i^{(k+1)}} \right)^2 + \left( \frac{P_{ij}^{(k)} x_{ij} - Q_{ij}^{(k)} r_{ij}}{V_i^{(k+1)}} \right)^2} \quad (2-4)$$

对于规模不大的网络,可手工计算,精度要求不高时,作一轮计算即可。若已给定容许误差为  $\epsilon$ ,则以

$$\max\{|V_i^{(k+1)} - V_i^{(k)}|\} \leq \epsilon$$

作为计算收敛的依据。

### 2.1.2 两级电压的开式电力网计算

图 2-3 示出有两级电压的开式电力网及其等值电路。

变压器的实际变比为  $k$ ,变压器的阻抗已归算到线路 1 的电压级。已知末端功率  $S_{LD}$  和首端电压  $V_A$  的电压级,欲求末端电压  $V_d$  和网络的功率损耗。