



普通高等教育“十二五”规划教材  
21 世纪电力系统及其自动化规划教材

# 电力系统分析

孙淑琴 李昂 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

21 世纪电力系统及其自动化规划教材

# 电力系统分析

孙淑琴 李 昂 编著

机械工业出版社

本书着重讲述电力系统各元件参数及模型, 电力系统稳态、暂态及稳定性分析的基本原理及方法。全书共分八章, 内容包括: 绪论、电力系统各元件稳态参数及模型、电力系统稳态运行分析计算、电力系统有功功率及频率调整、电力系统无功功率及电压调整、电力系统对称故障分析计算、电力系统不对称故障分析计算、电力系统的稳定性分析计算, 并附有习题。

本书既可供高等学校电气工程、电力系统等相关专业师生使用, 也可作为电力系统相关专业工程技术人员的参考书。

本书配有免费电子课件, 欢迎选用本书作教材的老师发邮件到 [jinaemp@163.com](mailto:jinaemp@163.com) 索取, 或登录 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 注册下载。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统分析 / 孙淑琴, 李昂编著. —北京: 机械工业出版社, 2011. 12  
普通高等教育“十二五”规划教材  
ISBN 978-7-111-36568-6

I. ①电… II. ①孙…②李… III. ①电力系统—系统分析—高等学校—教材 IV. ①TM711

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 241981 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: 吉 玲 责任编辑: 吉 玲 谷玉春

封面设计: 张 静 责任印制: 乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2012 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 16.5 印张 · 404 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-36568-6

定价: 35.00 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

社服 务 中 心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销 售 一 部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销 售 二 部: (010) 88379649

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

# 前 言

“电力系统分析”课程是高等工科院校电气类相关专业本科生的专业基础课,是原有“电力系统稳态分析”、“电力系统暂态分析”两门课程的结合。随着目前高等教育教学改革的实施,一些院校逐渐减少了“电力系统分析”课程的教学学时,调整了教学内容,本书就是在这种情况下,通过多年的教学实践编著的适用于本、专科生的一本教材。

本书在结构、形式及内容上参考了电力系统稳态分析、暂态分析等相关经典中文教材,结合英文教材《电力系统分析与设计》(英文影印版)的特点、优秀理念和系统分析思想,经过精心整理,舍弃了原有中文教材中复杂公式的推导过程及大量的手算方法,通过例题详细讲解了电力网络潮流及短路计算的过程,使学生懂得计算是为了更好地分析系统的运行状况,为系统设计提供依据,进而使学生增加了学习这门课程的兴趣。

本书主要阐述电力系统基础知识、电力系统各元件稳态参数和模型、电力系统稳态分析、电力系统暂态模型及分析、电力系统稳定性分析几部分。本书可用于理论教学和实践教学两阶段,理论教学主要讲解基本理论和计算方法,实践教学则深入学习潮流、短路、稳定性等计算机算法,通过书中例题的详细求解过程初步掌握编程技术。

本书第1、2、3、4、5、8、9章由吉林大学孙淑琴编写,第6、7章由陕西理工学院的李昂编写,全书由孙淑琴负责统稿。

近年来,上千名吉林大学的本科生和研究生听我讲授了这门课,学生们对知识的渴求与热情,及在进行课程设计、毕业论文设计时提出的一些新颖想法和讨论中的意见都给了我很多启发,部分学生为本书提供了教学反馈、搜集了资料、绘制了部分图表和对部分例题进行了整理,在此对他们表示感谢。

我要感谢吉林大学仪器科学与电气工程学院和电气系的领导在教学上给予的支持和信任,为我提供了良好的教学与科研环境,使我能够顺利地完成本书的编写工作。

我还要感谢吉林省电力科学研究院院长郑良华和界金星两位高级工程师,他们认真审阅了全部书稿,并提出了宝贵意见和修改建议。在本书编写过程中参阅了书后“参考文献”中所列文献,以及国内电力设计院的相关资料,还参考了国内的相关电力设计规程等技术资料,在此对原作者表示衷心感谢!

由于作者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请广大读者和同仁批评指正。

孙淑琴  
地质宫

# 目 录

## 前言

## 第1章 绪论 ..... 1

### 1.1 电力系统概述 ..... 1

#### 1.1.1 电力工业在国民经济中的地位 ..... 1

#### 1.1.2 我国电力工业的历史及发展方向 ..... 1

#### 1.1.3 电力系统的基本参数 ..... 2

### 1.2 电力系统运行应满足的基本要求 ..... 3

#### 1.2.1 电力系统的特点 ..... 3

#### 1.2.2 电力系统运行的基本要求 ..... 4

### 1.3 电力系统接线方式和电压等级 ..... 5

#### 1.3.1 电力系统的接线方式 ..... 5

#### 1.3.2 电力系统的电压等级 ..... 6

#### 1.3.3 电力系统不同电压等级的适用范围 ..... 8

#### 1.3.4 电力系统中性点接地方式 ..... 8

### 1.4 电气工程学科和电力系统分析课程 ..... 11

#### 1.4.1 电气工程学科 ..... 11

#### 1.4.2 电力系统分析课程的内容 ..... 12

#### 1.4.3 计算机在电力系统运行与规划中的应用 ..... 12

### 习题 ..... 13

## 第2章 电力系统各元件稳态参数及模型 ..... 15

### 2.1 同步发电机数学模型及运行特性 ..... 15

#### 2.1.1 同步发电机稳态数学模型 ..... 15

#### 2.1.2 原动机调节效应 ..... 18

#### 2.1.3 励磁调节效应 ..... 20

#### 2.1.4 同步发电机接入系统 ..... 21

#### 2.1.5 同步发电机的运行范围 ..... 22

### 2.2 电力线路的参数及数学模型 ..... 23

#### 2.2.1 电力线路的基本结构 ..... 23

#### 2.2.2 电力线路的参数 ..... 24

#### 2.2.3 电力线路的数学模型 ..... 27

### 2.3 电力变压器的参数与数学模型 ..... 33

#### 2.3.1 理想变压器 ..... 33

#### 2.3.2 实际双绕组变压器 ..... 34

#### 2.3.3 三绕组变压器 ..... 38

#### 2.3.4 自耦变压器 ..... 41

#### 2.3.5 变压器的 $\pi$ 形等效电路 ..... 43

### 2.4 电力系统负荷 ..... 44

### 2.5 电力网络的数学模型 ..... 45

#### 2.5.1 多电压等级网络中参数及变量的归算 ..... 45

#### 2.5.2 标么制 ..... 49

#### 2.5.3 多电压等级电力网络标么值等效电路 ..... 54

#### 2.5.4 具有非标准电压比变压器时的电力网络等效电路 ..... 57

### 习题 ..... 61

## 第3章 电力系统稳态分析计算 ..... 62

### 3.1 潮流计算的基本原理 ..... 62

#### 3.1.1 潮流计算的基本物理量 ..... 62

#### 3.1.2 潮流计算的数学模型 ..... 63

#### 3.1.3 潮流计算的约束条件 ..... 65

### 3.2 电力网络潮流计算的手算法 ..... 65

#### 3.2.1 电压降落与功率损耗的计算 ..... 65

#### 3.2.2 辐射形电力网络的潮流计算 ..... 69

#### 3.2.3 远距离输电线路的潮流分布 ..... 75

### 3.3 复杂电力网络潮流计算的计算机解法 ..... 79

#### 3.3.1 导纳矩阵的形成 ..... 79

#### 3.3.2 高斯-塞德尔法 ..... 83

#### 3.3.3 牛顿-拉夫逊法 ..... 89

#### 3.3.4 快速分解法 ..... 104

#### 3.3.5 直流法 ..... 109

### 习题 ..... 113

## 第4章 电力系统有功功率及频率调整 ..... 115

### 4.1 有功功率平衡 ..... 115

#### 4.1.1 有功功率平衡与备用容量 ..... 115

#### 4.1.2 有功功率电源 ..... 116

#### 4.1.3 各类发电厂(机组)的合理组合 ..... 117

### 4.2 频率调整的必要性 ..... 118

### 4.3 电力系统的频率特性 ..... 119

#### 4.3.1 发电机组自动调速系统的

|                          |     |                           |     |
|--------------------------|-----|---------------------------|-----|
| 工作原理 .....               | 119 | 6.3.1 同步发电机在空载情况下突        |     |
| 4.3.2 发电机组的有功功率-频率       |     | 然三相短路的物理过程 .....          | 151 |
| 静态特性 .....               | 120 | 6.3.2 无阻尼绕组同步发电机空载        |     |
| 4.3.3 有功负荷的频率静态特性 .....  | 121 | 时的突然三相短路电流 .....          | 153 |
| 4.4 频率调整 .....           | 122 | 6.3.3 无阻尼绕组同步发电机负载        |     |
| 4.4.1 频率的一次调整 .....      | 122 | 时的突然三相短路电流 .....          | 155 |
| 4.4.2 频率的二次调整 .....      | 123 | 6.3.4 有阻尼绕组同步发电机的突        |     |
| 4.4.3 主调频厂的选择 .....      | 123 | 然三相短路电流 .....             | 157 |
| 4.4.4 互联系统的频率调整 .....    | 124 | 6.3.5 自动调节励磁装置对短路电        |     |
| 习题 .....                 | 125 | 流的影响 .....                | 159 |
| <b>第5章 电力系统无功功率及电压</b>   |     | 6.4 电力系统三相短路的实用计算 .....   | 161 |
| 调整 .....                 | 126 | 6.4.1 短路电流实用计算的基本假        |     |
| 5.1 无功功率平衡 .....         | 126 | 设与基本任务 .....              | 161 |
| 5.1.1 电力系统中的无功功率电源 ..... | 126 | 6.4.2 起始次暂态电流的计算 .....    | 162 |
| 5.1.2 电力系统中的无功功率负荷       |     | 6.4.3 任意时刻三相短路电流的计算 ..... | 166 |
| 及无功功率损耗 .....            | 128 | 6.5 计算机计算复杂系统短路电流周期       |     |
| 5.1.3 电力系统中的无功功率平衡 ..... | 129 | 分量起始值的原理 .....            | 168 |
| 5.2 电压调整的必要性 .....       | 130 | 6.5.1 基本原理 .....          | 168 |
| 5.2.1 电压偏移对用电设备的影响 ..... | 130 | 6.5.2 用节点阻抗矩阵计算的方法 .....  | 169 |
| 5.2.2 无功功率与节点电压的关系 ..... | 132 | 6.5.3 用节点导纳矩阵计算的方法 .....  | 170 |
| 5.2.3 负荷分类及其对电压影响的       |     | 6.5.4 短路点在线路上任意处的计算       |     |
| 控制 .....                 | 133 | 方法 .....                  | 172 |
| 5.3 电压管理与电压调整 .....      | 133 | 习题 .....                  | 173 |
| 5.3.1 电压中枢点的概念 .....     | 134 | <b>第7章 电力系统不对称故障分析</b>    |     |
| 5.3.2 电压中枢点的电压偏移和调       |     | 计算 .....                  | 175 |
| 压方式 .....                | 134 | 7.1 对称分量法 .....           | 175 |
| 5.3.3 电压调整的方法 .....      | 135 | 7.1.1 不对称短路后电力网络的特点 ..... | 175 |
| 习题 .....                 | 142 | 7.1.2 对称分量法的概念 .....      | 176 |
| <b>第6章 电力系统对称故障分析</b>    |     | 7.1.3 对称分量法在电力系统不对称       |     |
| 计算 .....                 | 143 | 短路分析中的应用 .....            | 177 |
| 6.1 短路的基本知识 .....        | 143 | 7.2 电力系统元件的序参数 .....      | 180 |
| 6.1.1 短路的原因、类型及危害 .....  | 143 | 7.2.1 发电机的负序和零序电抗 .....   | 180 |
| 6.1.2 计算短路电流的基本目的 .....  | 144 | 7.2.2 异步电动机的负序电抗和零序       |     |
| 6.2 无限大功率电源供电系统的三相       |     | 电抗 .....                  | 181 |
| 短路 .....                 | 145 | 7.2.3 变压器的零序参数和等效电路 ..... | 182 |
| 6.2.1 无限大功率电源的概念 .....   | 145 | 7.2.4 输电线路的零序阻抗 .....     | 190 |
| 6.2.2 无限大功率电源供电电路突       |     | 7.2.5 电缆线路的零序阻抗 .....     | 193 |
| 然三相短路的暂态过程 .....         | 146 | 7.3 电力系统的序网络 .....        | 194 |
| 6.2.3 短路冲击电流和短路全电流       |     | 7.4 简单不对称短路故障分析 .....     | 198 |
| 有效值 .....                | 148 | 7.4.1 单相接地短路 .....        | 199 |
| 6.2.4 短路容量 .....         | 149 | 7.4.2 两相短路 .....          | 201 |
| 6.3 同步发电机突然三相短路的物理       |     | 7.4.3 两相接地短路 .....        | 203 |
| 过程及短路电流分析 .....          | 151 | 7.4.4 正序等效定则 .....        | 206 |

|                                    |            |                             |            |
|------------------------------------|------------|-----------------------------|------------|
| 7.5 不对称短路时网络中电流和电压的分布 .....        | 208        | 8.1.2 暂态稳定 .....            | 222        |
| 7.5.1 不对称短路时网络中电流和电压的分布计算和规律 ..... | 209        | 8.2 同步发电机的机电特性 .....        | 223        |
| 7.5.2 对称分量经变压器后的相位变化 .....         | 210        | 8.2.1 同步发电机的转子运动方程 .....    | 223        |
| 7.6 不对称短路时运算曲线的应用 .....            | 214        | 8.2.2 发电机的电磁转矩和功率 .....     | 224        |
| 7.7 电力系统非全相运行的分析 .....             | 215        | 8.3 电力系统的静态稳定 .....         | 225        |
| 7.7.1 单相断线 .....                   | 216        | 8.3.1 单机一无穷大系统的静态稳定 .....   | 225        |
| 7.7.2 两相断线 .....                   | 217        | 8.3.2 小扰动法分析电力系统的静态稳定 ..... | 228        |
| 7.8 不对称故障的计算机算法 .....              | 218        | 8.3.3 多机系统的静态稳定近似分析 .....   | 231        |
| 7.8.1 不对称故障的通用边界条件 .....           | 218        | 8.3.4 提高系统静态稳定性的措施 .....    | 234        |
| 7.8.2 计算机计算程序原理框图 .....            | 219        | 8.4 电力系统的暂态稳定 .....         | 236        |
| 习题 .....                           | 219        | 8.4.1 基本假定 .....            | 236        |
| <b>第8章 电力系统的稳定性分析计算</b> .....      | <b>221</b> | 8.4.2 简单电力系统的暂态稳定分析 .....   | 236        |
| 8.1 电力系统稳定的概念 .....                | 221        | 8.4.3 电力系统的暂态稳定计算 .....     | 242        |
| 8.1.1 静态稳定 .....                   | 221        | 8.4.4 提高系统暂态稳定性的措施 .....    | 248        |
|                                    |            | 习题 .....                    | 253        |
|                                    |            | <b>参考文献</b> .....           | <b>255</b> |

# 第1章 绪 论

## 本章提要

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需要。本章主要讲述电力工程的基本知识，内容有电力工业的地位、历史及发展方向，电力系统的基本参数、组成，电力系统的基本要求，电力系统的电压等级等。

## 1.1 电力系统概述

### 1.1.1 电力工业在国民经济中的地位

电能是一种十分重要的二次能源，它是由蕴藏于自然界中的煤、石油、水力、天然气、核燃料等一次能源转换而来的，同时，电能也可以转换为机械能、光能、热能等其他形式的能量供人们使用。电能的生产和使用具有其他能源不可比拟的优点，例如，它转换容易，可以远距离输送，能灵活、方便地进行控制，生产成本低，对环境污染低等，因此，电能已成为工业、农业、交通运输、国防科技及人民生活等各方面不可缺少的能源。

电力工业的发展水平是一个国家经济发达程度的重要标志。电力工业在我国国民经济中占有十分重要的地位，是国民经济重要的基础工业，也是国民经济发展战略中的重点和先行产业。电力工业必须优先于其他工业部门的发展而发展，其建设和发展的速度必须高于国民经济生产总值的增长速度，只有这样，国民经济各部门才能够快速而稳定地发展，这是社会的进步、综合国力的增强和人民物质文化生活现代化的需要。“科技要发展，电力要先行”，可以看出电能对国民经济和人民日常生活中的作用。

### 1.1.2 我国电力工业的历史及发展方向

19 世纪上半叶电磁学的蓬勃发展为电气技术的兴起奠定了理论基础，而电能的应用则促进了工业化国家生产力的飞速发展。1820 年奥斯特通过实验证实了电流的磁效应，1831 年法拉第发现了电磁感应定律，在此基础上，很快出现了原始的交流发电机、直流发电机和直流电动机。原始的电力线路使用的就是 100 ~ 400V 低压直流电，但输电电压低，输送的距离不可能远，输送的功率也不可能大。

1882 年法国人德波列茨首先实现了较高压的直流输电，将位于密士巴赫煤矿的蒸汽机发出的电能输送到 57km 外的慕尼黑，用以驱动水泵运转。采用的电压为直流 1500 ~ 2000V，输送的功率为 1.5kW，效率为 60%。随着生产的发展，要求增大输送功率与输送距离，提高输送效率，这就要求提高输电电压，而发电机电压为了避免出现电晕不可能提高得很高，且直流高压输电与用户低压用电之间存在着难以克服的矛盾，使得当时的直流输电制遇到很大的挑战。于是，1885 年匈牙利工程师吉里等研究出封闭磁路的单相变压器，由此实现了单相交流输电。1889 年俄国工程师先后发明了三相异步电动机、三相变压器和三相交流制。1891 年德国工程师奥斯卡·冯·密勒主持展出了最早的输电系统，奠定了近代三相交流输电技术的基础。

三相交流制的优越性很快显示出来，使运用三相交流制的发电厂迅速发展，而直流制不久便被淘汰。随着输电电压、输送距离和输送功率的不断提高，更大规模的电力系统不断涌现。

自 19 世纪 80 年代开始有了输电工程以来,已有 100 多年的历史。近代电力系统的面貌已今非昔比,旧貌换新颜。电力系统不仅在输电电压、输送距离、输送功率等方面有了千百倍的增长,而且在电源构成、负荷成分等方面也有很大变化。在电源构成方面不仅有燃烧煤、石油、天然气等利用化学能的火力发电厂,利用水能的水力发电厂,利用核能的核发电厂,还有利用太阳能、风能、潮汐能、地下热能等的发电厂。在负荷成分方面,不仅有电动机、电灯,还有相当比重的电热炉、整流装置等。

从 20 世纪 60 年代以来,以电子技术(控制、通信和计算机技术)引入电力系统为标志,使其在运行管理上实现高度自动化。如今,不仅组成电力系统的各主要环节都配备有日益数字化的测量、保护、控制装置,而且不少电力系统还配有用以管理全系统运行的计算机系统。这种计算机系统,称为能量管理系统。它与电力系统联机,具有持续不断监视、控制后者的功能。

更值得一提的是,为彻底解决交流输电中同步发电机并联运行的稳定性问题,工程师又转向直流输电,从而进一步提高输送能力。如今的直流输电电压已超过  $\pm 600\text{kV}$ ,输电距离已超过  $1000\text{km}$ ,输送功率已超过  $3000\text{MW}$ 。

### 1.1.3 电力系统的基本参数

电力系统主要由发电厂、输电线路、配电系统及负荷组成,通常覆盖广阔的地域。发电厂将原始能源转换为电能,经过输电线路送至配电系统,再由配电线路把电能分配给负荷(用户),由上述四个部分组成的统一整体称为电力系统。发电机将机械能转换为电能,输电线连接发电厂与配电系统以及与其他系统实行互连。配电系统连接由输电线供电的区域内的所有单个负荷。电力负荷包括电灯、电热器、电动机(感应电动机、同步电动机等)、整流器、变频器或其他装置,在这些设备中电能又将转换为光能、热能、机械能等。

由此可见,广义的电力系统应该是由锅炉、反应堆、汽轮机、水轮机等动力源,发电机等生产电能的设备,变压器、电力线路等变换、输送、分配电能的设备,电动机、电热炉、电灯等各种消耗电能的设备,以及测量、保护、控制装置乃至能量管理系统所组成的统一整体,是一个庞大而复杂的整体。电力系统中,由变压器、电力线路等变换、输送、分配电能的设备所组成的部分常称为电力网络,如图 1-1 所示。

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(一天、一月或一年)内电力系统总有功功率负荷的最大值,以千瓦(kW)、兆瓦(MW)、吉瓦(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,以兆瓦时(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  $50\text{Hz}$ 。国外则有额定频率为  $60\text{Hz}$  或  $25\text{Hz}$  的电力系统。

#### 6. 最高电压

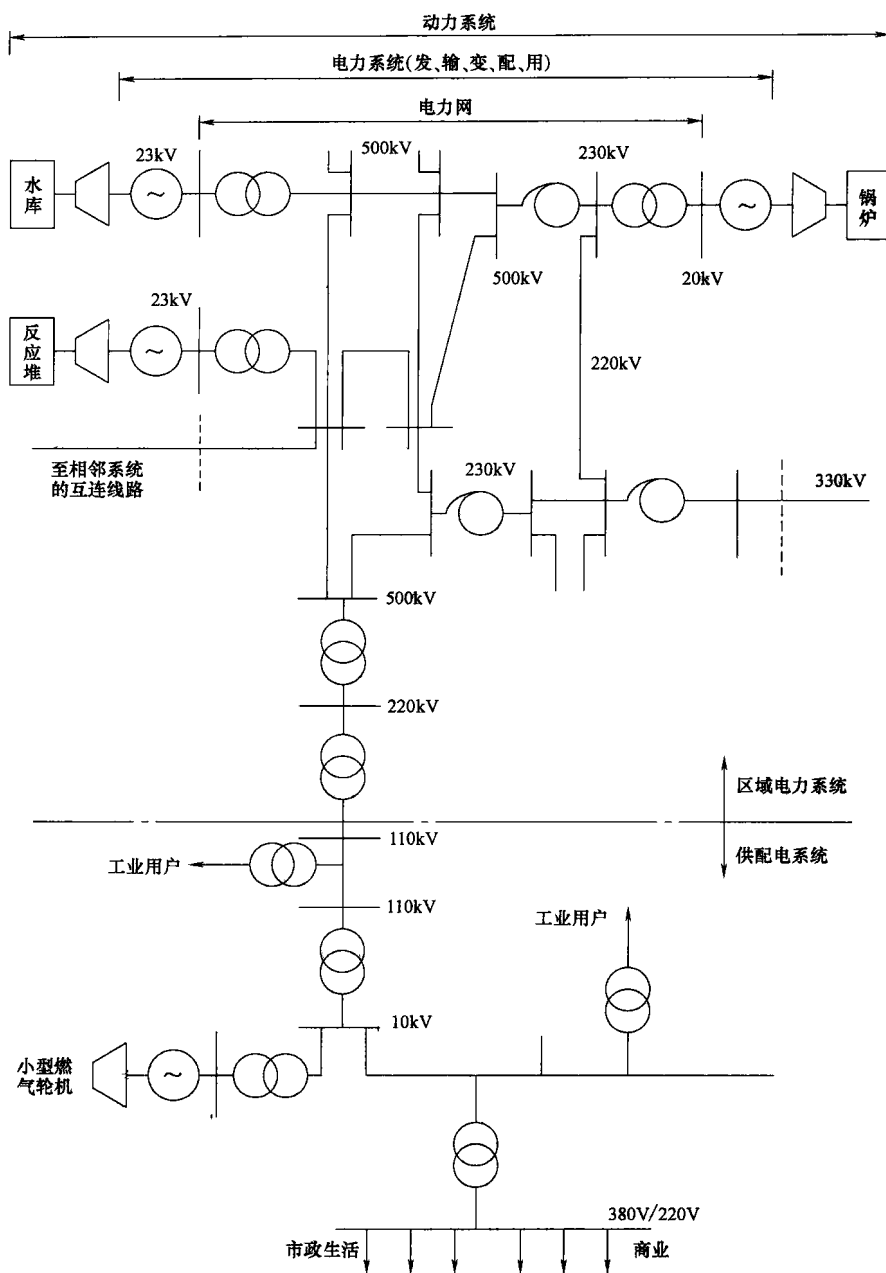


图 1-1 电力系统和电力网示意图

所谓电力系统的最高电压，是指该系统中最高电压等级电力线路的额定电压，以千伏(kV)计。

## 1.2 电力系统运行应满足的基本要求

### 1.2.1 电力系统的特点

1) 电能与国民经济各个部分之间的关系都很密切。

2) 电力系统的各种暂态过程非常短促, 当电力系统受到扰动后, 由一种状态过渡到另一种状态的时间非常短。

3) 电能不能大量储存。即电能的生产、输送、分配及消费几乎是同时进行的, 在任一时刻, 发电机发出的电能等于负荷消费的电能 (在发电机容量允许范围内)。

4) 对电能质量 (电压和频率) 的要求十分严格, 偏离规定值过多时, 将导致产生废品、损坏设备, 甚至出现从局部范围到大面积停电。

由于以上特点, 电力系统的运行必须安全可靠。

对近代电力系统有一初步认识之后, 下面对其如何运行的问题, 作一初步探索。电能也是商品, 但电能的生产、输送和消费却有其特殊性。

### 1.2.2 电力系统运行的基本要求

根据电能生产、输送、消费的特殊性, 对于电力系统运行有如下三点基本要求:

#### 1. 保证供电的可靠性

对用户供电的中断将会使生产停止, 人民的生活秩序、生活质量受到影响, 甚至会危及人身、设备的安全, 造成严重后果。但是在某种特殊情况下, 当电力系统无法满足全部负荷的需要时, 应有选择性的保证重要用户的供电。根据供电可靠性分类, 电力负荷分为三级。

##### (1) 一级负荷

对一级负荷中断供电, 将可能造成生命危险、设备损坏、破坏生产过程, 使大量产品报废, 给国民经济造成重大损失, 使市政生活发生混乱。

##### (2) 二级负荷

对二级负荷中断供电, 将造成大量减产、交通停顿, 使城镇居民生活受到影响等。

##### (3) 三级负荷

不属于一、二级负荷的其他负荷, 如工厂的附属车间、小城镇等。

#### 2. 保证良好的电能质量

电能质量包含电压质量、频率质量和波形质量三个方面。电压质量和频率质量一般都以偏移是否超过给定值来衡量, 我国规定, 用户供电电压的允许偏移量是额定值的  $+5\% \sim -7\%$ , 额定频率是  $50\text{Hz}$ , 允许的偏移量为  $\pm 0.2 \sim \pm 0.5\text{Hz}$ 。波形质量则以畸变是否超过给定值来衡量, 所谓畸变率 (或正弦波形畸变率) 是指各次谐波有效值二次方和的方根值与基波有效值的百分比。给定的允许畸变率常因供电电压等级而异, 例如, 以  $380\text{V}$ 、 $220\text{V}$  供电时为  $5\%$ , 以  $10\text{kV}$  供电时为  $4\%$ , 等等。所有这些质量指标, 都必须采取一些手段予以保证。

对于电压质量和频率质量的保证, 我国电力行业早有要求, 并将其作为考核电力系统运行质量的重要内容之一。在当前条件下, 为保证电能质量, 需要增加系统电源的有功功率、无功功率, 合理调配用电、节约用电, 提高系统的自动化水平。保证波形质量, 就是指限制系统中电流、电压的谐波, 关键在于限制各种环流装置、电热炉等非线性负荷向系统注入的谐波电流, 或改进换流装置的设计、装设滤波器、限制不符合要求的非线性负荷等的接入等。

#### 3. 保证系统运行的经济性

电能的生产规模很大, 消耗的一次能源占国民经济一次能源总消耗比重约为  $1/3$ , 而且电能 在变换、输送、分配时的损耗绝对值也相当可观。因此, 降低每生产  $1\text{kW} \cdot \text{h}$  电所消耗的能源和降低变换、输送、分配时的损耗, 具有重要意义。煤耗率和线损率是考核电力系统运行经济性的重要指标, 所谓煤耗率, 是指用煤生产  $1\text{kW} \cdot \text{h}$  电能所消耗的标准煤重, 以  $\text{g/kW} \cdot \text{h}$  为单位, 而标准煤则是含热量为  $29.31\text{MJ/kg}$  的煤; 所谓线损率或网损率, 是指电力网络中损耗的电能与向电力网络供应电能的百分比。

为保证系统运行的经济性，应开展系统经济运行工作，使各发电厂所承担的负荷合理分配，在保证安全、优质供电的前提下，将单一电力系统联合组成联合电力系统，可以提高供电可靠性，减少备用容量，可更合理地调配用电，降低联合系统的最大负荷，提高发电设备的利用率，减少系统中发电设备的总容量，可更合理地利用系统中各种类型的发电厂，从而提高运行的经济性。同时，由于个别负荷在系统总负荷中所占比重的减小，其波动对系统电能质量的影响也将减小。

## 1.3 电力系统接线方式和电压等级

### 1.3.1 电力系统的接线方式

电力系统接线图是电力系统整体性质的图形表示，分为地理接线图与电气接线图。地理接线图是在地图上布点布线，可与地图较好地吻合，显示系统中发电厂、变电站的地理位置，显示电力线路的路径，以及它们之间的连接形式，如图 1-2 所示。因此，由地理接线图可获得对该系统的宏观印象。由于地理接线图上难以表示主要发电机、变压器、线路等的联系，这时则需要阅读电气接线图。电气接线图一般表示为单线电气接线图，显示电力系统的各个能量变换元件、能量输送元件的连接，显示出组成电力系统主体设备（发电机、变压器、母线、断路器、电力线路等）的概貌。因此，由电气接线图可获得对该系统的更细致了解。实际应用时，一般将地理接线图与单线电气接线图相结合，可以了解整个系统中发电厂、变电站、电力线路、负荷等的相对位置及电气连接形式。

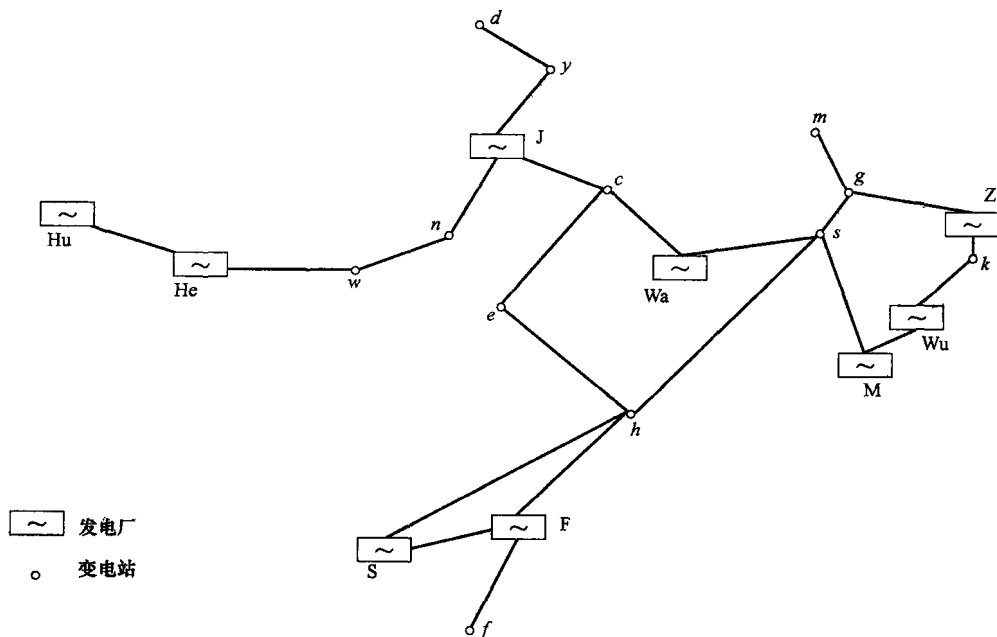


图 1-2 电力系统地理接线图

电力系统的接线方式按供电可靠性分为无备用接线方式和有备用接线方式两种。无备用接线方式是指负荷只能从一条路径获得电能的接线方式，根据形状，它包括单回路放射式、干线式和链式网络，如图 1-3 所示。有备用接线方式是指负荷至少可以从两条路径获得电能的接线方式，它包括双回路的放射式、干线式、链式、环式和两端供电网络，如图 1-4 所示。

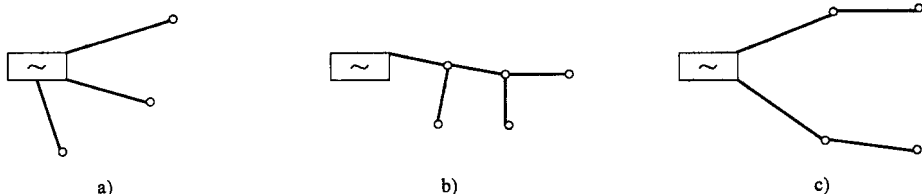


图 1-3 无备用接线图

a) 放射式 b) 干线式 c) 链式

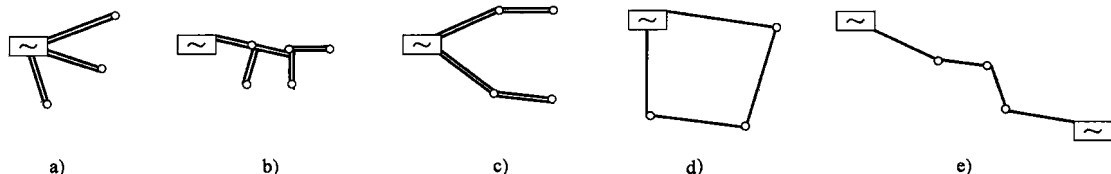


图 1-4 有备用接线图

a) 放射式 b) 干线式 c) 链式 d) 环式 e) 两端供电网

无备用接线方式的主要优点在于简单、经济、运行操作方便，主要缺点是供电可靠性差，并且在线路较长时，线路末端电压往往偏低，因此这种接线方式不适用于一级负荷占很大比重的场合。但在一级负荷的比重不大，并可为这些负荷单独设置备用电源时，仍可采用这种接线方式。这种接线方式之所以适用于二级负荷是由于架空电力线路已广泛采用自动重合闸装置，而自动重合闸的成功率相当高。

有备用接线方式的主要优点在于供电可靠性高，供电电压质量高。有备用接线方式中，双回路的放射式、干线式和链式接线的缺点是不够经济；环式网络的供电可靠性和经济性都不够，其缺点是运行调度复杂，并且故障时的电压质量差；两端供电网络很常见，供电可靠性高，但采用这种接线方式的先决条件是必须有两个或两个以上独立电源，并且各电源与各负荷点的相对位置又决定了这种接线方式的合理性。

可见，接线方式的选择要经技术经济比较后才能确定。所选的接线方式在满足安全、优质、经济的指标外，还应保证运行灵活和操作方便、安全。

### 1.3.2 电力系统的电压等级

电力系统由多个层次的电压等级组成，这些不同的电压等级是由国家规定的标准电压组成的，又称为额定电压。在电力系统中，各部分电压等级之所以不同，是因为三相功率值正比于线电压及线电流 ( $S = \sqrt{3}UI$ )。当输送功率一定时，输电电压愈高，则输送电流愈小，所用导线截面积愈小，从而线路投资愈小；但电压愈高对绝缘的要求愈高，杆塔、变压器、断路器的绝缘投资也愈大。综合考虑这些因素，对于一定的输送功率和输送距离应有一最合理的线路电压，但从设备制造角度考虑，为保证生产的系列性，又不应任意确定线路电压。另外，规定的标准电压等级过多也不利于电力工业的发展。我国国家标准规定的高压交流输电电压为 6kV、10kV、35kV、(60kV)、110kV、(154kV)、220kV、330kV、500kV（其中 60kV 和 154kV 为历史上遗留下的将被限制发展的电压等级）和 750kV，见表 1-1。因而，选择电力线路电压时，只能选用国家规定的电压等级。

现将表 1-1 中用电设备、线路、发电机与变压器的额定电压之间的关系说明如下：

经线路输送功率时，沿线路的电压分布往往是始端高于末端。例如，如图 1-5 所示，沿线段  $ab$  的电压分布可能如直线  $U_a - U_b$  所示。从而，图中用电设备 1~6 的端电压将各不相同。所谓

线路的额定电压  $U_N$  实际就是线路的平均电压  $(U_a + U_b) / 2$ ，而各用电设备的额定电压则与线路额定电压相等，使所有用电设备能在接近它们的额定电压下运行。

表 1-1 额定电压等级

| 用电设备额定线电压/kV | 交流发电机电线电压/kV | 变压器线电压/kV |             |
|--------------|--------------|-----------|-------------|
|              |              | 一次绕组      | 二次绕组        |
| 3            | 3.15         | 3 及 3.15  | 3.15 及 3.3  |
| 6            | 6.3          | 6 及 6.3   | 6.3 及 6.6   |
| 10           | 10.5         | 10 及 10.5 | 10.5 及 11.0 |
|              | 15.75        | 15.75     |             |
|              | 23.0         | 23.0      |             |
| 35           |              | 35        | 38.5        |
| 110          |              | 110       | 121         |
| 220          |              | 220       | 242         |
| 330          |              | 330       | 345 及 363   |
| 500          |              | 500       | 525 及 550   |
| 750          |              | 752       | 788 及 825   |

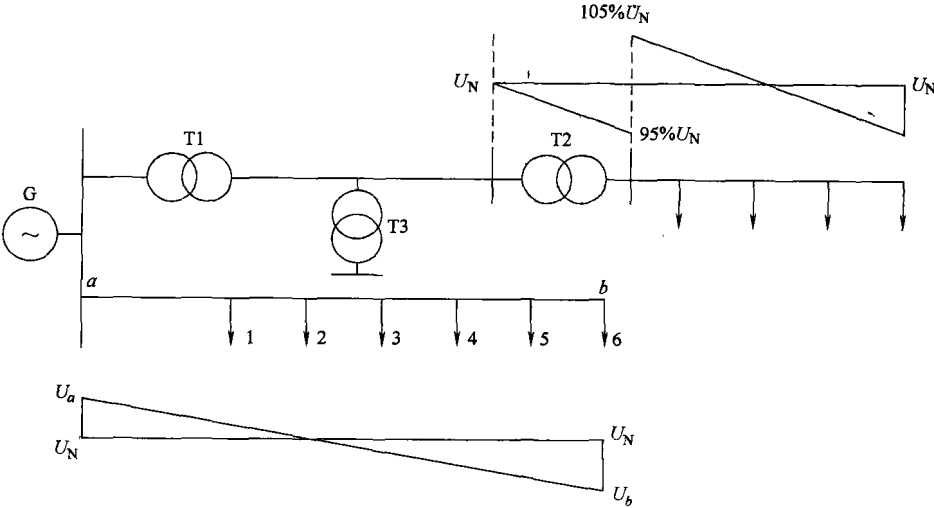


图 1-5 电力网中的电压分布

由于用电设备的允许电压偏移一般为  $\pm 5\%$ ，而沿线路的电压降落一般为  $10\%$ ，这就要求线路始端电压为额定值的  $105\%$ ，以使其末端电压不低于额定值的  $95\%$ 。发电机往往接在线路始端，因此发电机的额定电压为线路额定电压的  $105\%$ 。

变压器一次侧接电源，相当于用电设备，二次侧向负荷供电，又相当于发电机。因此，变压器一次侧额定电压应等于用电设备额定电压（直接和发电机相连的变压器一次电压应等于发电机额定电压），二次电压应较线路额定电压高  $5\%$ 。但又因变压器二次电压规定为空载时的电压，而额定负荷下变压器内部的电压降落约为  $5\%$ ，为使正常运行时变压器二次电压较线路额定电压高  $5\%$ ，变压器二次侧额定电压应较线路额定电压高  $10\%$ 。只有漏抗很小的、二次侧直接与用电设备相连的和电压特别高的变压器，其二次侧额定电压才可能较线路额定电压仅高  $5\%$ 。

某一实例网络图如图 1-6 所示，各母线及变压器一、二次电压已标于图中。

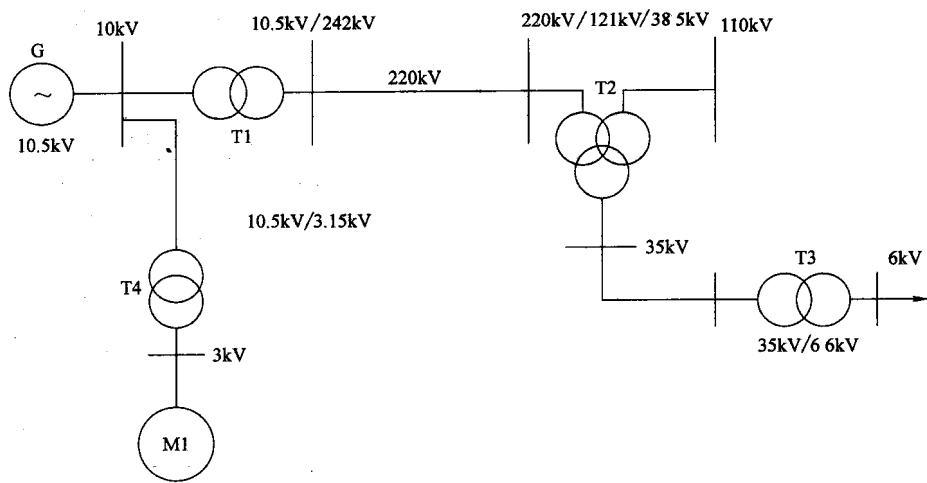


图 1-6 电力系统中各元件额定电压

1.3.3 电力系统不同电压等级的适用范围

额定电压等级中相邻电压等级差之比不宜过小，根据经验，110kV 以下的电压等级差之比应超过 3 倍，如 110kV、35kV、10kV；110kV 以上的电压等级差之比则以两倍左右为宜，如 110kV、220kV、500kV。因此，其他各级电压都有其适用范围，3kV 限于工业企业内部采用；10kV 是最常用的城乡配电电压；当负荷中高压电动机比重很大时采用 6kV 配电；35kV 用于中等城市或大工业企业内部供电，也用于农村电网；110kV 即用于中小电力系统的主干线，也用于大电力系统的二次网络；220kV、330kV、500kV 多半用于大电力系统的主干线。显然，这种划分不是绝对的，也不是一成不变的。例如，在农业用电负荷较重的地区就以 110kV 作为农村网络电压；随着容量的增大，大电力系统主干线电压等级进一步提高后，330kV、220kV 就可能退为二次网络电压。表 1-2 提供了不同电压等级的输送功率与输送距离的经验值。

表 1-2 架空线路的电压与输送功率、输送距离

| 线路电压/kV | 输送功率/MW         | 输送距离/km   |
|---------|-----------------|-----------|
| 3       | 0.1 ~ 1.0       | 1 ~ 3     |
| 6       | 0.1 ~ 1.2       | 4 ~ 15    |
| 10      | 0.2 ~ 2.0       | 6 ~ 20    |
| 35      | 2.0 ~ 10.0      | 20 ~ 50   |
| 110     | 10.0 ~ 50.0     | 50 ~ 150  |
| 220     | 100.0 ~ 500.0   | 100 ~ 300 |
| 330     | 200.0 ~ 800.0   | 200 ~ 600 |
| 500     | 1000.0 ~ 1500.0 | 150 ~ 850 |
| 750     | 2000.0 ~ 2500.0 | 500 以上    |

1.3.4 电力系统中性点接地方式

电力系统的中性点是指星形联结的变压器或发电机的中性点。电力系统中性点接地方式是一个涉及到供电的可靠性、过电压与绝缘配合、继电保护、通信干扰、系统稳定等诸多方面的综合技术问题，这个问题在不同的国家和地区，不同的发展水平可以有不同的选择。

中性点运行方式主要分为两类：直接接地和不接地。直接接地系统供电可靠性低。这种系统中一相接地时，出现了除中性点外的另一接地点，构成了短路回路，接地相电流很大，为了防止损坏设备，必须迅速切除接地相甚至三相。不接地系统供电可靠性高，但对绝缘水平要求也高。这种系统中一相接地时，不构成短路回路，接地相电流不大，不必切除接地相，但这时非接地相的对地电压却升高为相电压的 $\sqrt{3}$ 倍。在电压等级较高的系统中，绝缘费用在设备总价格中占相当大的比重，降低绝缘水平带来的经济效益很显著，一般就采用中性点直接接地方式，而以其他措施提高供电可靠性。反之，在电压等级较低的系统中，一般就采用中性点不接地方式以提高供电可靠性。在我国，110kV 及以上的系统中性点直接接地，60kV 以下的系统中性点不接地。

属于中性点不接地方式的还有中性点经消弧线圈接地。所谓消弧线圈，就是电抗线圈。比较图 1-7 和图 1-8 可理解消弧线圈的功能。由图 1-7 可见，由于导线对地有电容，中性点不接地系统中一相接地时，接地点接地相电流属容性电流，而且随网络的延伸，这电流也愈益增大，以至完全有可能使接地点电弧不能自行熄灭并引起弧光接地过电压，甚至发展成严重的系统性事故。为避免发生上述情况，可在网络中某个中性点处装设消弧线圈，如图 1-8 所示。由图 1-8 可见，由于装设了消弧线圈，构成了另一回路，接地点接地相电流中增加了一个感性电流分量，它和装设消弧线圈前的容性电流分量相消，减小了接地点的电流，使电弧易于自行熄灭，提高了供电可靠性。一般认为，对 3 ~ 60kV 网络，容性电流超过下列数值时，中性点应装设消弧线圈：3 ~ 6kV 网络，30A；10kV 网络，20A；35 ~ 60kV 网络，10A。

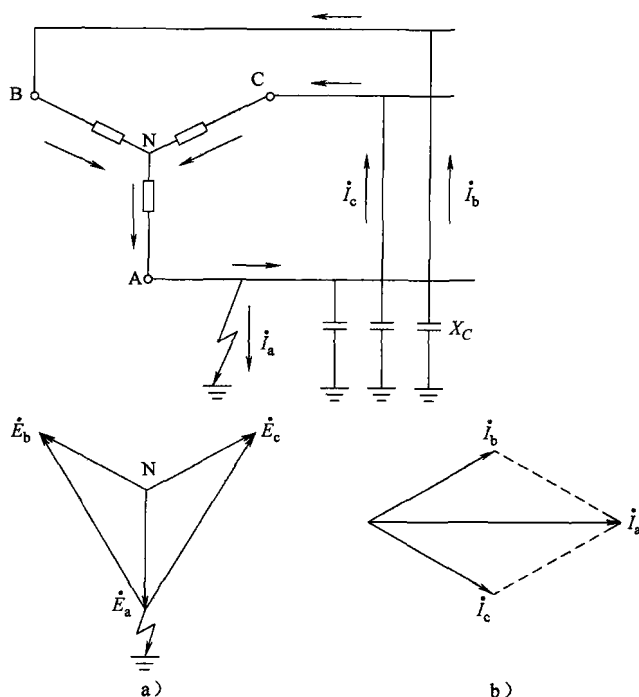


图 1-7 中性点不接地时的一相接地

a) 电流分布 b) 电动势、电流相量关系

城乡配电网主要是指 10kV、35kV、66kV 三个电压等级的电网，它们在电力系统中量大面广，占有重要的地位。在过去，由于配电网比较小，主要采用不接地或经消弧线圈接地方式，一般来说运行情况是良好的；在 20 世纪 80 年代中后期，有些配电网的中性点采用了经低电阻接地或高电阻接地方式；近年来，各种不同形式的自动跟踪补偿的消弧线圈开始在配电系统中使用。

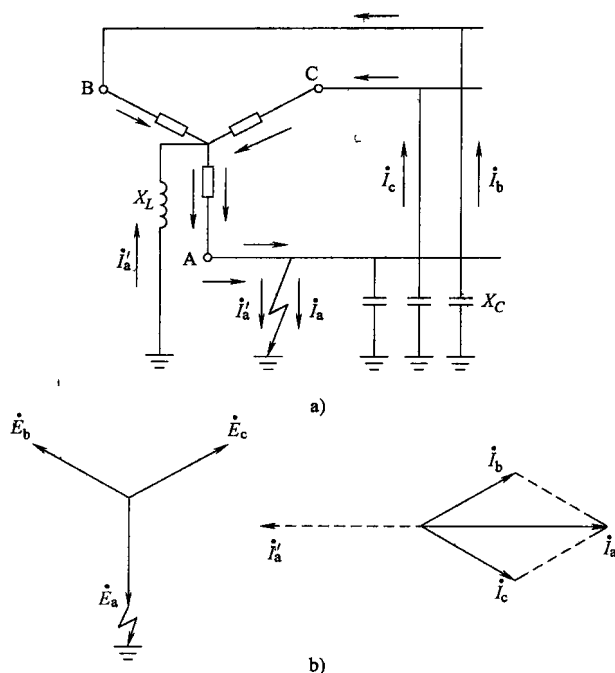


图 1-8 中性点经消弧线圈接地时的一相接地

a) 电流分布 b) 电动势、电流相量关系

各种中性点接地方式和装置都有一定的适用范围和使用条件，为此，采用不同的中性点接地方式是很正常的。我国城乡电网正在加快建设与改造的速度，中性点接点方式对于电网的发展是重要的技术问题，引起了多方面的关注和重视。

### 1. 中性点不接地系统

如果三相电源电压是对称的，则电源中性点的电位为零，但是由于架空线排列不对称而换位又不完全等原因，使各相对地导纳不相等，则中性点将会产生位移电压。一般情况位移电压不超过电源电压的 5%，对运行的影响不大。当中性点不接地配电网发生单相接地故障时，非故障的两相对地电压将升高，由于线电压仍保持不变，对用户继续工作影响不大。

单相接地时，当接地电流大于 10A 而小于 30A 时，有可能产生不稳定的间歇性电弧，随着间歇性电弧的产生将引起幅值较高的弧光接地过电压，其最大值不会超过 3.5 倍相电压，对于正常设备有较大的绝缘裕度，应能承受这种过电压，对绝缘较差的设备、线路上的绝缘弱点和绝缘强度很低的旋转电机有一定威胁，在一定程度上对安全运行有影响。由于中性点不接地配电网的单相接地电流很小，对邻近通信线路、信号系统的干扰小，这是这种接地方式的一个优点。

### 2. 中性点经电阻接地

有些配电网发展很快，城市中心区大量敷设电缆，单相接地电容电流增长较快，虽然装设了消弧线圈，由于电容电流较大，且运行方式经常变化，消弧线圈调整困难，还由于使用了一部分绝缘水平低的电缆，为了降低过电压水平，减小相间故障可能性，因此采用了中性点经低电阻接地的方式。采用中性点经低电阻接地方式，当  $R_n \leq 10\Omega$  时，在大多数情况下可使单相接地工频电压的标幺值升高降低到 1.4 左右。从限制弧光接地过电压考虑，当电弧点燃到熄灭过程中，系统所积累的多余电荷在熄灭后半工频周波内能够通过  $R_n$  泄漏掉，过电压幅值就可明显下降。根据这个要求可以得到中性点的低电阻值应满足的条件为

$$R_n \leq 1/3\omega C_0$$