



# 电力系统分析同步训练

华北电力大学 杨淑英 主编

GAODENGJIAOYU XUEXI FUDAO GONGSHU

中国电力出版社

高等教育学习辅导丛书

# 电力系统分析同步训练

华北电力大学 杨淑英 主编

中国电力出版社

## 内 容 提 要

本书是一本供学习“电力系统分析”课程的辅导书,与全国高等教育自学考试“电力系统及其自动化”专业的指定教材《电力系统分析》相适应。

全书由四个部分组成。第一部分(第一至六章)为电力系统稳态分析;第二部分(第七至十章)为电力系统暂态分析。第一部分和第二部分共分为十章,各章辅导内容包括重点和难点提示、解题示例及习题等。第三部分为习题解;第四部分为试卷。

本书可供电力系统及其自动化专业(本科段)自学考试学生使用,也可以供从事电力系统工作的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

电力系统分析同步训练/杨淑英主编. —北京:中国电力出版社, 2003

全国高等教育自学考试指定教材. 电力系统及其自动化专业. 独立本科

ISBN 7-5083-1644-4

I. 电… II. 杨… III. 电力系统—分析—高等教育—自学考试—自学参考资料 IV. TM711

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 086109 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

\*

2004 年 1 月第一版 2004 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.75 印张 445 千字

印数 0001—3000 册 定价 30.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

# 前 言

本书为全国高等教育自学考试本科段“电力系统及自动化”专业的“电力系统分析”课程的辅助教材。

“电力系统分析”这门课是第一门专业课，在教学计划中起着承先启后的作用，它的先修课程是：电工原理、电磁场、电机学，它又和其他专业课程（如发电厂电气部分、电力系统继电保护原理、电力系统自动装置原理及其他专业选修课程）密切相关。因此，学好“电力系统分析”课程非常重要。但是大部分学生反映在学习过程中有很大难度，为更好地满足教学需要，培养出大批高质量的电力事业的建设人才，作者编写了本书，并力求使本书具有较强的系统性、针对性和可操作性。

本书内容共分四个部分，第一部分是电力系统稳态分析；第二部分是电力系统暂态分析；第三部分是习题解；第四部分是模拟试卷。

本书由李庚银教授主审，并在编写过程中提出了许多宝贵意见，在此表示衷心感谢。

由于编写的时间短，内容较多，书中难免有缺点、错误，诚恳地希望读者提出批评指正。

编 者

2003年3月

# 目 录

## 前言

### 第一部分 电力系统稳态分析

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 第一章 电力系统的基本概念                  | 1  |
| § 1-1 电力系统概述                   | 1  |
| § 1-2 电力系统接线方式和电压等级            | 3  |
| 第二章 电力系统各元件的特性参数和等值电路          | 9  |
| § 2-1 电力系统各主要元件的参数和等值电路        | 9  |
| § 2-2 电力系统的等值网络                | 16 |
| 第三章 简单电力系统潮流计算                 | 24 |
| § 3-1 电力线路和变压器上的功率损耗、电压降落及电能损耗 | 24 |
| § 3-2 简单辐射形网络的潮流计算             | 27 |
| § 3-3 简单环形网络的潮流分布              | 30 |
| § 3-4 网络变换                     | 33 |
| 第四章 电力系统潮流的计算机算法               | 41 |
| § 4-1 电力网络的数学模型                | 41 |
| § 4-2 电力系统潮流分布的计算方法            | 48 |
| 第五章 电力系统有功功率平衡与频率调整            | 61 |
| § 5-1 电力系统中有功功率的平衡             | 61 |
| § 5-2 电力系统中有功功率的最优分配           | 62 |
| § 5-3 电力系统的频率调整                | 64 |
| 第六章 电力系统无功功率平衡与电压调整            | 71 |
| § 6-1 电力系统中无功功率的最优分布           | 71 |
| § 6-2 电力系统的电压调整                | 72 |

### 第二部分 电力系统暂态分析

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 第七章 电力系统对称故障分析计算         | 84  |
| § 7-1 无限大功率电源供电系统的三相短路分析 | 84  |
| § 7-2 同步发电机突然三相短路分析      | 87  |
| § 7-3 电力系统三相短路的实用计算      | 98  |
| 第八章 电力系统不对称故障的分析计算       | 109 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| § 8-1 对称分量法及其应用 .....        | 109 |
| § 8-2 电力系统中主要元件的各序参数 .....   | 112 |
| § 8-3 不对称故障的分析计算 .....       | 115 |
| <b>第九章 电力系统静态稳定性分析</b> ..... | 131 |
| § 9-1 各类旋转元件的机电特性 .....      | 131 |
| § 9-2 电力系统的静态稳定性 .....       | 135 |
| <b>第十章 电力系统暂态稳定性分析</b> ..... | 145 |
| § 10-1 简单电力系统的暂态稳定性 .....    | 145 |
| § 10-2 复杂电力系统的暂态稳定计算 .....   | 150 |
| § 10-3 提高电力系统暂态稳定性的措施 .....  | 150 |

### 第三部分 习题解

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| <b>第一章 电力系统的基本概念</b> .....         | 155 |
| <b>第二章 电力系统各元件的特性参数和等值电路</b> ..... | 155 |
| <b>第三章 简单电力系统潮流计算</b> .....        | 166 |
| <b>第四章 电力系统潮流的计算机算法</b> .....      | 182 |
| <b>第五章 电力系统有功功率平衡与频率调整</b> .....   | 190 |
| <b>第六章 电力系统无功功率平衡与电压调整</b> .....   | 197 |
| <b>第七章 电力系统对称故障分析计算</b> .....      | 209 |
| <b>第八章 电力系统不对称故障的分析计算</b> .....    | 225 |
| <b>第九章 电力系统静态稳定性分析</b> .....       | 256 |
| <b>第十章 电力系统暂态稳定性分析</b> .....       | 269 |

### 第四部分 模拟试卷

|                      |     |
|----------------------|-----|
| <b>附录 常用参数</b> ..... | 300 |
| <b>参考文献</b> .....    | 307 |

# 第一部分 电力系统稳态分析

电力系统稳态分析，讨论的内容分为两类：一类是电力系统正常运行状况下的分析与潮流分布计算（一～四章讨论）；另一类是电力系统正常运行状况的优化和调整（五～六章讨论）。

## 第一章 电力系统的基本概念

主要内容提示：

本章主要阐明电力系统的基本概念、电力系统运行的特点和要求、电力系统的接地方式和电压等级、电力系统中性点的运行方式。

### § 1-1 电力系统概述

#### 一、电力系统、电力网和动力系统的基本概念

系统的定义：由两个以上互相区别、互相作用的单元间，有机地结合起来，完成某一功能的综合体。

由于系统要完成某一功能，总是有输出的，有输出就必定有输入，其中再经一些加工或处理，因此输入、输出、加工处理构成了系统的三要素。

电力系统的主要元件有发电机、变压器、电力线路及用户的用电设备等，它们之间有区别，又能相互作用，组成统一的综合体，实现电的功能。图 1-1 所示是一个简单电力系统图。发电机生产电能，输电线路输送电能，用户使用电能，升压变压器把低压电能变换为高压电能，便于网络传输。降压变压器把高压电能变换为低压电能，便于用户使用。这样一个产生电能、输送和分配电能、使用电能所连接起来的一个整体即是电力系统。

(1) 定义电力系统：由发电机、变压器、电力线路及用电设备等在电气上相互连接所组成的有机整体。

其中电力线路担负着输送电能与分配电能的任务。由电源向电力负荷中心输送电能的线路，称为输电线路；主要担负分配电能任务的线路称为配电线路。

如果将图 1-1 中除去发电机、用电设备，剩下的部分即是电力线路和它两边的变压器，称之为电力网，简称电网。

(2) 定义电力网：由各种电压等级的输、配电线路，以及由它们所联系起来的各类变电所组成的网络。

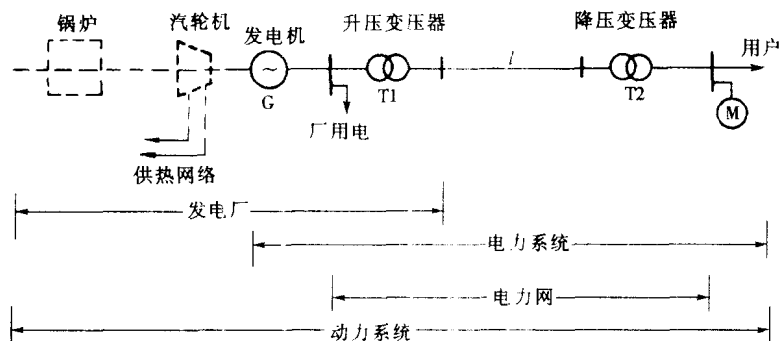


图 1-1 动力系统、电力系统、电力网示意图

电力网中,包含输电线路的电网称为输电网;包含配电线路的电网称为配电网。电力网按其本身结构方式,又可分为开式电力网和闭式电力网。凡用户只能从单方向得到供电的电力网称为开式电力网;凡用户可以从两个以上方向得到供电的电力网称为闭式电力网。

(3) 定义动力系统:由“电力系统”加上它的“动力部分”。

如图 1-1 所示,动力系统是指“电力系统”与“动力部分”的总和。所谓动力部分,随电厂的性质不同而不同,包括:

- 1) 火力发电厂的锅炉、汽轮机、供热网络;
- 2) 水力发电厂的水库、水轮机;
- 3) 原子能发电厂的反应堆。

由以上可知,“电力网”是“电力系统”的一个组成部分,而“电力系统”又是“动力系统”的一个组成部分。懂得了这样一个简单系统,由浅入深,对于多台机、多个变压器,多条输电线路、多个用户所构成的复杂系统,也可以分清它的电力网、电力系统及动力系统。

## 二、电力系统运行的特点和要求

### 1. 电力系统运行的特点

(1) 电能不能大量储存。电能的产生和消耗使用是平衡的,每时每刻产生的电能要等于消耗和使用的电能,因此说,电能的产生、输送、分配、消耗使用几乎是同时进行的。

(2) 电力系统的暂态过程非常迅速。电能的传输近似于光的速度(30 万 km/s),以电磁波的形式传播,“快”是它的很大的特点,故元件的切除或投入引起电力系统瞬时波动。电力系统从一种运行状态过渡到另一种状态,其暂态过程(过渡过程)非常迅速。

(3) 与国民经济各部门紧密相关。由于电能很容易由其他自然能源转换而成,所以电能宜于大量产生,又便于输送、分配、控制,使用电能比使用其他能量有显著的优点,因此,电能国民经济各部门得到了广泛的应用。

### 2. 对电力系统运行的基本要求

- (1) 保证供电的可靠性;
- (2) 保证良好的电能质量;
- (3) 保证系统运行的经济性。



## § 1-2 电力系统接线方式和电压等级

### 一、电力系统接线方式

电力系统是最大的人工系统，敷设在非常广大的地域上，因而任何人想要在不长的时间内看到整个系统的全部连接情况是不可能的。只有通过接线图，才能迅速知道（了解）整个系统的连接情况。

#### （一）电力系统接线图

电力系统接线图有电气接线图和地理接线图两种形式。

##### 1. 电气接线图

如图 1-2 (a) 所示，在电气接线图上，要求突出表明电力系统各主要元件（电机、变压器、电力线路等）之间的电气连接关系。唯一要求是清楚、一目了然，而不过分重视实际位置如何、距离的比例关系。

##### 2. 地理接线图

如图 1-2 (b) 所示，在地理接线图上，很强调电厂与变电站之间的实际位置关系，以及各条输电线路的路径长度都是按一定比例反映出来，但不反映各主要元件之间的电气连接关系。

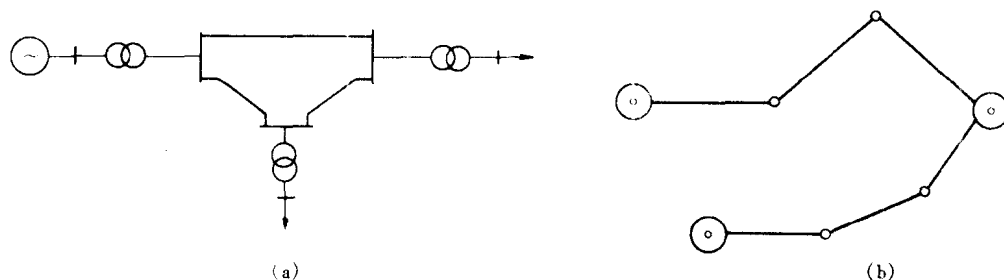


图 1-2 接线图

(a) 电力系统的电气接线图；(b) 电力系统的地理接线图

通常，为了较清楚地掌握电力系统接线情况，往往将这两种图配合使用。

#### （二）电力系统接线方式

电力系统的接线方式应满足电力系统运行的基本要求：①必须保证用户供电的可靠性；②必须能灵活地适应各种可能的运行方式；③应力求节约设备和材料，减少设备费用和运行费用，使电网的建设和运行比较经济；④应保证各种运行方式下运行人员能够安全操作。

按照以上要求，不论是户内网络、城市网络，还是区域性网络，其接线方式大致可分无备用和有备用两类。

##### 1. 无备用接线

所谓无备用接线，就是指用户只能从一个方向取得电源的接线方式，包括放射式、干

线式、链式，如图 1-3 所示。

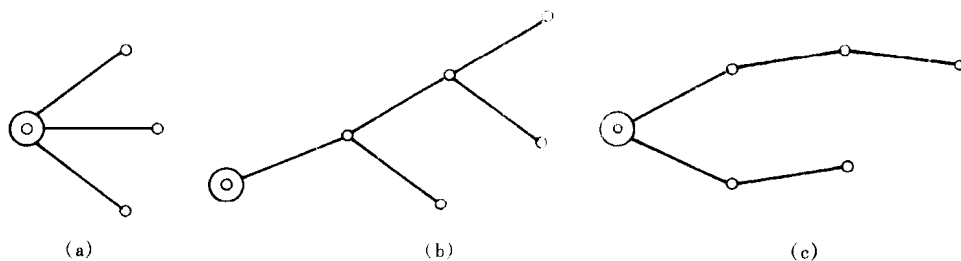


图 1-3 无备用接线

(a) 放射式；(b) 干线式；(c) 链式

无备用接线的特点是简单、经济、运行方便灵活，但供电可靠性差，电能质量差。为了提高这类电网的供电可靠性，除了加强检查与维护，通常是在适当的地点装设继电保护装置，以便使故障线路切断，并保证有一定的选择性，从而尽可能地缩小停电范围。

## 2. 有备用接线

有备用接线是指用户可以从两个或两个以上方向取得电源的接线方式，包括双回路的放射式、干线式、链式、环式和两端供电网等，如图 1-4 所示。

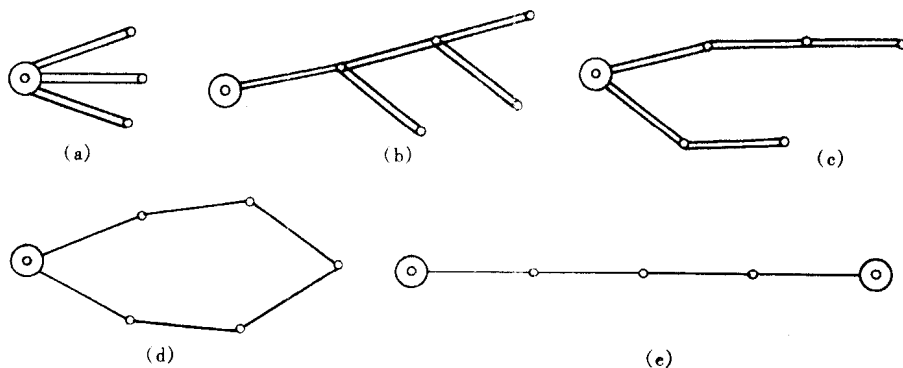


图 1-4 有备用接线方式

(a) 放射式；(b) 干线式；(c) 链式；(d) 环式；(e) 两端供电网

有备用接线的优点是供电可靠、电能质量高；缺点是运行操作和继电保护复杂，经济性较差。

由以上可知，各种形式的接线各有优缺点，实际中应该采用哪一种方案好，需要进行技术和经济性能的比较，比较供电可靠性、电能质量、经济性、操作方便与灵活性等四个方面，还应考虑当前国家的经济政策，最后确定出可行的接线方案。

## 二、电力系统电压等级

目前、我国电力系统的电压等级有 3kV、6kV、10kV、35kV、110kV、220kV、330kV、500kV。

电力系统正常运行时，发电机、变压器、用电设备等最经济的电压称为额定电压。

在同一电压等级中，电力系统的各个环节（发电机、变压器、电力线路、用电设备）的额定电压数值并不相同，某一级的额定电压是以用电设备的额定电压为中心而定的。为了满足用电设备对供电电压的要求，电力系统的额定电压应与用电设备的额定电压相一致。下面说明电力系统主要元件——发电机、变压器、电力线路、用电设备的额定电压的确定。

#### 1. 用电设备的额定电压

一般以  $U_N$  表示用电设备的额定电压（为其他元件的参考电压）。

#### 2. 输电线路的额定电压

输电线路的首端和末端均可接用电设备，而用电设备的端电压一般容许在额定电压的  $\pm 5\%$  以内波动。因而在没有调压设备的情况下，输电线路可以容许  $10\%$  的电压损耗。

若输电线路的首端电压较用电设备的额定电压高  $5\%$ ，即为  $U_1 = U_N (1 + 5\%)$ ，输电线路的末端电压较用电设备的额定电压低  $5\%$ ，即为  $U_2 = U_N (1 - 5\%)$ ，则输电线路的额定电压为  $(U_1 + U_2) / 2 = U_N$ 。

#### 3. 发电机的额定电压

发电机做为直接配电的电源，总是接在线路的首端，它的额定电压应较输电线路的额定电压高  $5\%$ ，所以发电机的额定电压为  $U_{GN} = U_N (1 + 5\%)$ 。

#### 4. 变压器的额定电压

变压器的额定电压即为变压器两侧的额定电压，以变比表示为  $k = U_{1N} / U_{2N}$ 。

变压器具有发电机和负荷的双重地位，它的一次侧是接受电能的，相当于用电设备，它的二次侧是送出电能的，相当于发电机。所以变压器一次侧的额定电压等于用电设备的额定电压，即  $U_{1N} = U_N$ 。

对于直接与发电机相连的变压器，其一次侧额定电压等于发电机的额定电压，即  $U_{1N} = U_{GN} = U_N (1 + 5\%)$ 。

考虑到随着线路的沿线电压降落的情况，为保持在正常工作时变压器在二次侧的输出电压较后面线路的额定电压高  $5\%$ ，所以变压器二次侧的电压为  $U_{2N} = U_N (1 + 5\%)$ 。

若考虑变压器的负载运行时，将在变压器内部约有  $5\%$  的压降，则变压器二次侧的额定电压为  $U_{2N} = U_N (1 + 10\%)$ 。

变压器两侧的额定电压总结为：

$$\begin{aligned} \text{一次侧额定电压} & \begin{cases} U_{1N} = U_N & (\text{降压变压器或中间联络变压器}) \\ U_{1N} = U_{GN} & (\text{直接与发电机相连的变压器}) \end{cases} \\ \text{二次侧额定电压} & \begin{cases} U_{2N} = U_N (1 + 5\%) & (\text{空载}) \\ U_{2N} = U_N (1 + 10\%) & (\text{负载}) \end{cases} \end{aligned}$$

**【例 1-1】** 标出图 1-5 所示电力系统中各元件的额定电压。

**解** 各元件的额定电压标于图 1-6 中。

### 三、电力系统中性点接地方式

电力系统中性点接地方式有不接地、经消弧线圈接地、直接接地。

电压等级在  $35\text{kV}$  及以下者，中性点不接地或经消弧线圈接地，称为小接地方式；电

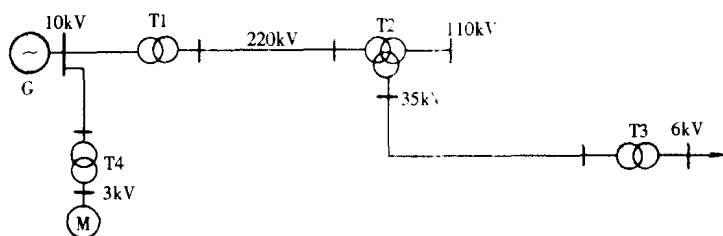


图 1-5 例 1-1a 图

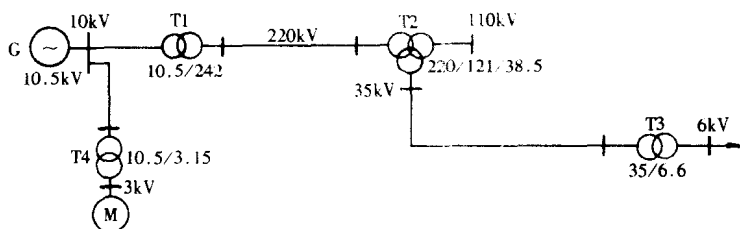


图 1-6 例 1-1b 图

压等级在 110kV 及以上者，中性点直接接地，称为大接地方式。

通常对于 35kV 及以下的网络，为防止单相接地故障时产生间歇电弧过电压，应设法减小接地电流，则在变压器的中性点装设消弧线圈。消弧线圈由电阻很小的电感线圈和铁芯构成。其作用：消弧线圈在短路回路中产生感性电流，以抵消或削弱接地点的电容电流，从而消除接地处的电弧以及由它所产生的危害。

#### 四、电力线路的结构

电力线路按结构可分为架空线路和电缆线路。

- (1) 架空线路的组成：由导线、避雷线、杆塔、绝缘子和金具等主要元件组成。
- (2) 电缆线路的内部构造一般包括三部分，即导体、绝缘层和保护层。

### 本章基本要求

1. 掌握和理解电力系统、电力网及动力系统的概念，注意它们之间的联系和区别。着重理解电力系统是发电、送电、供电和用电的整体。
2. 了解我国电力系统的发展史。
3. 掌握电力系统运行的特点及对电力系统运行的要求。
4. 掌握电力系统电气接线图和地理接线图的概念和它们的应用。
5. 掌握电力系统各种接线方式的主要特点。
6. 牢固掌握电力系统额定电压等级的概念和各种电压等级的适用范围。能熟练正确地选择用电设备，发电机、变压器的额定电压。
7. 了解电力系统中性点运行方式对电力系统运行的影响，掌握中性点运行方式和分类以及消弧线圈的作用。

## 习 题

- 1-1 什么叫电力系统、电力网及动力系统？电力系统为什么要采用高压输电？
- 1-2 为什么要规定额定电压？电力线、发电机、变压器和用电设备的额定电压是如何确定的？
- 1-3 我国电网的电压等级有哪些？
- 1-4 标出图 1-7 电力系统中各元件的额定电压

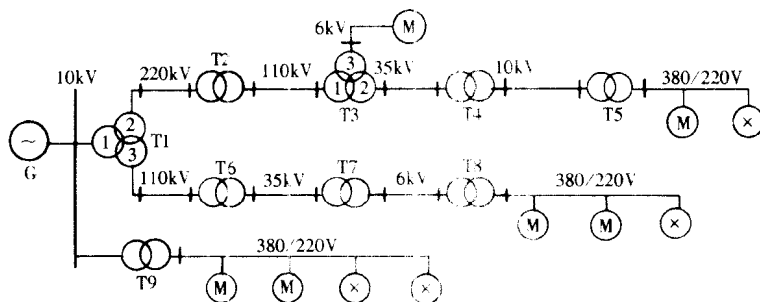


图 1-7 习题 1-4 图

- 1-5 请回答如图 1-8 所示电力系统中的二个问题：

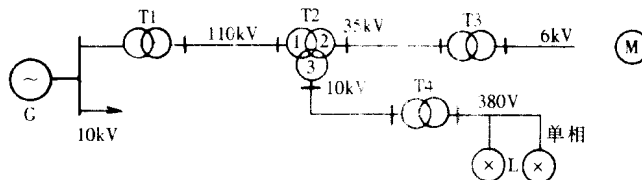


图 1-8 习题 1-5 图

- (1) 发电机 G、变压器 T1、T2、T3、T4、三相电动机 M、单相电灯 L 等各元件的额定电压。
- (2) 当变压器 T1 在 +2.5% 抽头处工作，T2 在主抽头处工作，T3 在 -2.5% 抽头处工作时，求这些变压器的实际变比。

- 1-6 图 1-9 中已标明各级电网的电压等级，试标出图中发电机和电动机的额定电压及变压器的额定变比。

- 1-7 电力系统接线如图 1-10 所示，电网各级电压示于图中。试求：

- (1) 发电机 G 和变压器 T1、T2、T3 高低压侧的额定电压。
- (2) 设变压器 T1 工作于 +2.5% 抽头，T2 工作于主抽头，T3 工作于 -5% 抽头，求这些

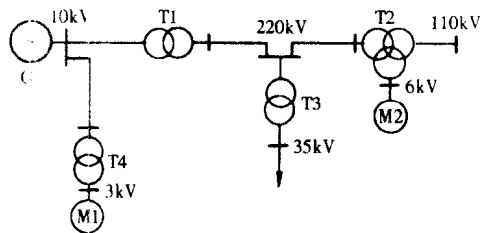


图 1-9 习题 1-6 图

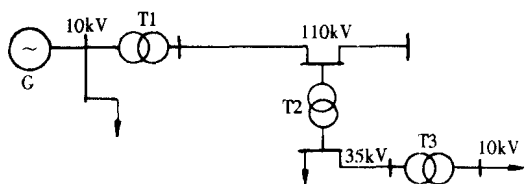


图 1-10 习题 1-7 图

变压器的变比。

1-8 比较两种接地方式的优缺点, 分析其适用范围。

1-9 什么叫三相系统的中性点位移？它在什么情况下发生？中性点不接地系统发生单相接地时，非故障相电压为什么增加 $\sqrt{3}$

倍？

1-10 若在变压器中性点经消弧线圈接地，消弧线圈的作用是什么？

1-11 什么叫分裂导线、扩径导线？为什么要用这种导线？

1-12 架空线为什么要换位？规程规定，架空线长于多少公里就应进行换位？

1-13 架空线的电压在 35kV 以上应该用悬式绝缘子，如采用 X-4.5 型绝缘子时，各种电压等级应使用多少片绝缘子？

## 第二章 电力系统各元件的特性 参数和等值电路

主要内容提示:

本章主要包括电力系统各主要元件的参数和等值电路,以及电力系统的等值网络。

### § 2-1 电力系统各主要元件的参数和等值电路

#### 一、发电机的参数和等值电路

一般情况下,发电机厂家提供参数为  $S_N$ 、 $P_N$ 、 $\cos\varphi_N$ 、 $U_N$  及电抗百分值  $X_G\%$ ,由此便可确定发电机的电抗  $X_G$ 。

按百分值定义有

$$X_G\% = X_G \times 100 = X_G \frac{S_N}{U_N^2} \times 100$$

因此

$$X_G = \frac{X_G\%}{100} \times \frac{U_N^2}{S_N} \quad (2-1)$$

求出电抗以后,就可求电动势  $\dot{E}_G$  ( $\dot{E}_G = \dot{U}_G + j\dot{I}_G X_G$ ),并绘制等值电路如图 2-1 所示。

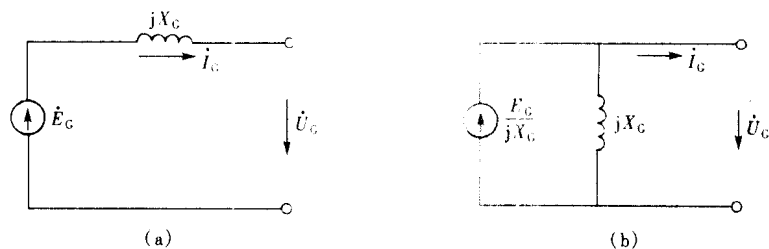


图 2-1 发电机的等值电路

(a) 电压源形式; (b) 电流源形式

#### 二、电力线路的参数和等值电路

电力线路等值电路的参数有电阻、电抗、电导和电纳。在同一种材料的导线上,其单位长度的参数是相同的,随导线长度的不同,有不同的电阻、电抗、电导和电纳。

##### 1. 电力线路单位长度的参数

电力线路每一相导线单位长度参数的计算公式如下:

(1) 电阻。计算公式为

$$r_1 = r_{20} [1 + \alpha(t - 20)] \quad (\Omega/\text{km}) \quad (2-2)$$

(2) 电抗。计算公式为

$$x_1 = 0.1445 \lg \frac{D_m}{r} + 0.0157 \quad (\Omega/\text{km}) \quad (2-3)$$

采用分裂导线时,使导线周围的电场和磁场分布发生了变化,等效地增大了导线半径,从而减小了导线电抗。此时,电抗为

$$x_1 = 0.1445 \lg \frac{D_m}{r_{\text{eq}}} + \frac{0.0157}{n} \quad (\Omega/\text{km})$$

式中  $D_m$ ——三相导线的几何均距;

$r_{\text{eq}}$ ——分裂导线的等效半径;

$n$ ——每相导线的分裂根数。

(3) 电纳。计算公式为

$$b_1 = \frac{7.58}{\lg \frac{D_m}{r}} \times 10^{-6} \quad (\text{S}/\text{km}) \quad (2-4)$$

采用分裂导线时,将上式中的  $r$  换为  $r_{\text{eq}}$  即可。

(4) 电导。计算公式为

$$g_1 = \frac{\Delta P_g}{U^2} \times 10^{-3} \quad (\text{S}/\text{km}) \quad (2-5)$$

式中  $\Delta P_g$ ——实测的三相线路的泄漏和电晕消耗的总功率,  $\text{kW}/\text{km}$ ;

$U$ ——实测时线路的工作电压。

电力线路单位长度的参数乘以长度即为电力线路的集中参数,于是有

$$R = r_1 l, \quad X = x_1 l, \quad G = g_1 l, \quad B = b_1 l$$

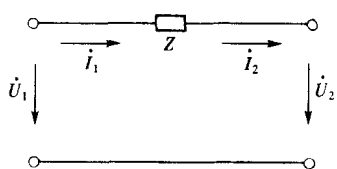


图 2-2 短线路的等值电路

## 2. 电力线路的等值电路

电力线路分为短线路 ( $l < 100\text{km}$  的架空线及不长的电缆线)、中长线路 ( $l < 100 \sim 300\text{km}$  的架空线及  $l < 100\text{km}$  的电缆线) 和长线路 ( $l > 300\text{km}$  的架空线及  $l > 100\text{km}$  的电缆线), 其等值电路有所不同。

(1) 短线路的等值电路。短线路的等值电路如图 2-2 所示。电压在  $35\text{kV}$  及以下的架空线路, 由于电压不高, 这种线路电纳  $B$  的影响不大, 可略去, 因此短线路的等值电路十分简单, 只有一个串联总阻抗  $Z = R + jX$ , 其基本方程为

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 + Z\dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_2 \end{cases}$$

(2) 中等长度线路。对于电压为  $110 \sim 330\text{kV}$ 、线长  $l = 100 \sim 300\text{km}$  之间的架空线路及  $l < 100\text{km}$  的电缆线路均可视为中等长度线路。这种线路, 由于电压较高, 线路的电纳一般不能忽略。等值电路常为  $\Pi$  形, 如图 2-3 所示。在  $\Pi$  形等值电路中, 除串联的线路总阻抗  $Z = R + jX$  外, 还将线路的

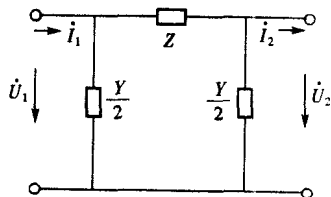


图 2-3 中长线路的等值电路



总导纳  $Y = jB$  分为两半, 分别并联在线路的始末两端

基本方程为

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \left( i_2 + \frac{1}{2} i_1 \right) Z \\ i_1 = \frac{Y}{2} \dot{U}_1 + \frac{Y}{2} \dot{U}_2 - i_2 \end{cases}$$

(3) 长线路的等值电路。电压为 330kV 及以上, 线长  $l > 300\text{km}$  的架空线路和线长  $l > 100\text{km}$  的电缆线路, 一般称之为长线路。长线路的各参数实际上是沿全线均匀分布的, 考虑分布特性后, 各参数乘以适当的修正系数, 其等值电路仍可用集中参数表示, 如图 2-4 所示, 其修正系数为

$$\begin{cases} K_r = 1 - x_1 b_1 \frac{l^2}{3} \\ K_x = 1 - \left( x_1 b_1 - \frac{r_1^2 b_1}{x_1} \right) \frac{l^2}{6} \\ K_b = 1 + x_1 b_1 \frac{l^2}{12} \end{cases}$$

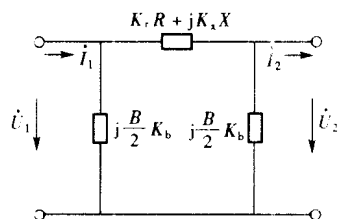


图 2-4 长线路的等值电路

### 3. 电力线路的电晕临界电压

校核线路是否会发生电晕, 其电晕临界电压 (相电压) 经验公式为

$$U_{cr} = 49.3 m_1 m_2 \delta r \lg \frac{D_m}{r} \quad (\text{kV}) \quad (2-6)$$

采用分裂导线时, 由于导线的分裂, 减小了电场强度, 电晕临界电压改为

$$U_{cr} = 49.3 m_1 m_2 \delta f_{nd} \lg \frac{D_m}{r_{eq}} \quad (\text{kV})$$

其中

$$f_{nd} = n \left[ 1 + 2(n-1) \frac{r}{d} \sin \frac{\pi}{n} \right]$$

式中  $f_{nd}$ ——与分裂状况有关的系数, 一般  $f_{nd} \geq 1$ ;

$d_{eq}$ ——分裂导线根与根之间的距离, cm;

$n$ ——分裂根数;

$r$ ——每根导体的半径, cm。

导线水平排列时, 边相导线的电晕临界电压较按上式求得的  $U_{cr}$  高 6%, 即  $U'_{cr} = 1.06 U_{cr}$ ; 中间相导线的电晕临界电压较按上式求得的  $U_{cr}$  低 4%, 即  $U'_{cr} = 0.96 U_{cr}$ 。

以上介绍了电晕临界电压的求法, 在实际线路工作电压一旦达到或超过临界电压时,

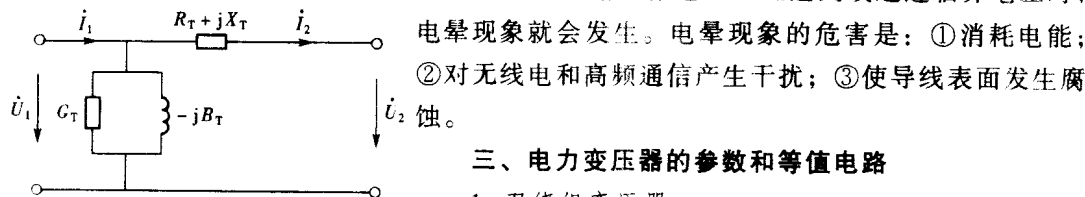


图 2-5 双绕组变压器等值电路

电晕现象就会发生。电晕现象的危害是: ①消耗电能; ②对无线电和高频通信产生干扰; ③使导线表面发生腐蚀。

## 三、电力变压器的参数和等值电路

### 1. 双绕组变压器

双绕组变压器的等值电路如图 2-5 所示, 其参数为