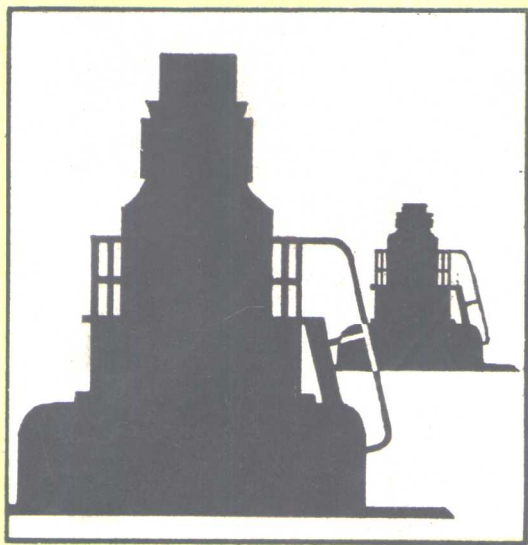


水力发电
技术知识
丛书
中国水力发电工程学会主编

第十七分册

发电机和 电气设备

潘隐萱 陆维勋



水利电力出版社

73.245

8704390

水力发电技术知识丛书

中国水力发电工程学会主编

第 十 七 分 册

发电机和电气设备

潘隐萱 陆维勋

水利电力出版社

内 容 提 要

本分册介绍水电厂电气一次专业方面的基本概念和基本知识,并简单介绍电力系统、交流输电及高压直流输电的一般知识,同时对这些专业的技术现状和发展亦作了简要说明。全书共七章,包括交流电的基本概念;水轮发电机及电力变压器的技术参数和基本构造;主要电气设备;水电厂及电力系统的运行方式以及交流输电、直流输电等内容。为了便于读者复习,在各章后面列有思考题。

本书可供具有中学文化程度、从事水电厂安装、运行等工作的初级技术工人及各级管理干部阅读。

水力发电技术知识丛书

第十七分册

发电机和电气设备

潘隐萱 陆维勋

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 5.75印张 125千字

1986年6月第一版 1986年6月北京第一次印刷

印数0001—4470册 定价1.05元

书号 15143·6029

关于编写《水力发电技术知识丛书》

说 明

为了水力发电战线广大职工学习科学技术，适应现代化水电建设和生产的需要，中国水力发电工程学会组织编写了一套《水力发电技术知识丛书》。丛书是从普及水力发电科学技术知识的角度出发，着重介绍水力发电的基本概念和基础知识，对我国在实践中取得的经验和国外水平以及发展前景也作适当介绍。

读者对象以具有中等学校文化程度以上的各级管理干部为主，使他们能系统地了解水力发电的科技知识，不断提高业务能力和管理水平。对于中等学校文化程度的技术工人，也可通过学习本丛书为学习专业技术打下初步基础，并在工作中不断提高技术水平。对于有某种专业的技术干部，也可了解其他相邻专业的一般知识。

本丛书共分二十五个分册：

- 第一分册 水力发电概况
- 第二分册 水能规划和综合利用
- 第三分册 水能经济
- 第四分册 水电工程地质
- 第五分册 水电工程勘测
- 第六分册 水文测验和水文计算
- 第七分册 坝、泄洪和进水建筑物
- 第八分册 引水工程及发电厂房

- 第九分册 过船过鱼过木建筑物
- 第十分册 水工机械设备
- 第十一分册 水工建筑物的运行维护和观测
- 第十二分册 水电工程的施工组织和管理
- 第十三分册 水工混凝土工程施工
- 第十四分册 土石工程及地下工程施工
- 第十五分册 施工导流工程
- 第十六分册 水轮机和辅助设备
- 第十七分册 发电机和电气设备
- 第十八分册 水电站集中控制、继电保护和自动化
- 第十九分册 机电设备的安装
- 第二十分册 机电设备的运行维护
- 第二十一分册 水电站水库调度
- 第二十二分册 水电站经济运行
- 第二十三分册 小型水电站
- 第二十四分册 抽水蓄能电站
- 第二十五分册 潮汐电站

本丛书各分册承蒙从事水电事业的有关单位和院校的专家教授大力支持，花了大量时间和精力进行编写和审校，特此一并致谢。

《水力发电技术知识丛书》编辑委员会

1982年8月

《水力发电技术知识丛书》

编辑委员会

主任 施嘉炆

副主任 陆钦侃、舒扬荣、刘颂尧

编委 (按姓氏笔划为序)

于开泉、王伊复、王圣培、伍正诚、冯尚友、

李毓芬、刘颂尧、沈晋、谷云青、陈叔康、

张勇传、汪景琦、施嘉炆、陆钦侃、唐集尹、

舒扬荣、董毓新、程学敏、杨德晔

前 言

按照《水力发电技术知识丛书》编写大纲的要求，本分册初稿为四章，即第一章发电机，第二章发电厂及电力系统，第三章发电厂的主要电气设备，第四章输电线路。第三章由水利电力部华东勘测设计院陆维勋编写，一、二、四章由清华大学潘隐萱编写。初稿经施嘉炀、陆钦佩同志及水电建设总局机电处有关同志审查，认为篇幅偏多、内容较深。另外，编委会建议增加直流输电内容。

在上述基础上，经潘隐萱重新编写成七章。其中，第四、五章采用了陆维勋初稿的部分内容。

在此一并对所有审阅书稿的同志表示感谢。

由于水平有限，不妥之处，请读者批评指正。

编 者

1985年6月

录

关于编写《水力发电技术知识丛书》说明

前 言

第一章 交流电及交流发电机的基本概念.....	1
第一节 直流电和交流电	1
第二节 电阻、电感和电容元件	7
第三节 交流电路中的功率	15
第四节 三相交流电及发电机模型	18
思考题	29
第二章 水轮发电机	30
第一节 水轮发电机的技术数据	30
第二节 水轮发电机的机械结构	38
第三节 水轮发电机的电磁结构	42
第四节 水轮发电机的通风冷却	48
思考题	50
第三章 水轮发电机的励磁系统	52
第一节 概述	52
第二节 直流电机励磁系统	54
第三节 自复励可控硅励磁系统	61
思考题	65
第四章 电力变压器	66
第一节 电力变压器的基本原理	66
第二节 电力变压器的基本结构	70
第三节 电力变压器的铭牌数据及生产系列	78

思考题	81
第五章 水电厂电气主结线及一次设备	82
第一节 电气主结线的内容及分类	82
第二节 高压断路器及隔离开关	93
第三节 电压互感器及电流互感器	103
第四节 发电厂及变电站的防雷及接地装置	112
思考题	118
第六章 水电厂及电力系统的运行	119
第一节 电力系统	119
第二节 水轮发电机的并列	133
第三节 有功调节及调频运行	136
第四节 无功调节及调相运行	147
第五节 水电厂在电力系统中的稳定运行	151
第六节 水轮发电机的超负荷运行	157
思考题	159
第七章 交流输电和直流输电	160
第一节 交流输电概述	160
第二节 高压直流输电简介	164
思考题	175

第一章 交流电及交流发电机的基本概念

现代工农业生产以及城乡人民生活用电，绝大部分为交流电；直流电的电源，除了干电池、蓄电池以外，大部分也是把交流电经过整流变成直流。发电厂中生产电力的是交流发电机（又称同步发电机）；电压较低的输电线和供电网络供给的电是交流电；电动机（俗称马达）使用的也是交流电。

第一节 直流电和交流电

一、直流电

我们知道，直流电的特点是电动势 E 或电压 U 的正负极性不会改变。根据欧姆定律，电压 U 、电流 I 和电阻 R 的关系是

$$U = IR$$

$$\text{或 } I = U/R \quad (I = E/R)$$

因而，在图1-1(a)的直流电路中，直流电流总是从电池的正极流出，经过电阻 R 而流到负极。电压、电流的大小和方向是不随时间的推移而变化的。用数学语言说：自变量为时间 t ，因变量为电动势 E （或电流 I ），如果 E （或 I ）不随 t 变化，则函数 E （或 I ）为一条直线，如图1-1(b)所示。

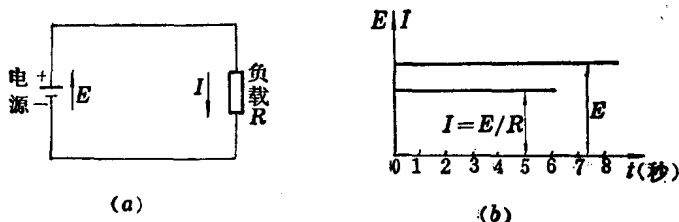


图 1-1 直流电路图
(a) 电路; (b) 直流电对时间的函数曲线

二、交流电

什么是交流电呢? 交流电的特点是: 电动势 $e(t)$ 或电压 $u(t)$ 的大小和极性都随时间而变化。在一般交流电路中, 电阻 R 不改变, 欧姆定律也适用, 即交流电流和电压、电阻的关系是

$$u(t) = i(t)R$$

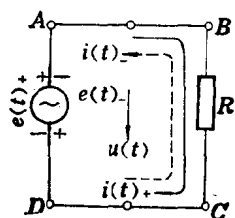
$$\text{或} \quad i(t) = \frac{u(t)}{R}$$

在图 1-2(a) 的简单交流电路中, 电动势 $e(t)$ 和电流 $i(t)$ 的大小和方向都随时间的推移而变化。在图 1-2(b) 中, 时间从 0 秒至 0.01 秒期间内, 电动势 $e(t)$ 和电流 $i(t)$ 的大小在曲线上表示为由零到最大再到零, 但始终为正值, 即电流 $i(t)$ 的方向自 A 点经 B 及 C, 至 D 点; 当时间从 0.01 秒至 0.02 秒的期间内, 电动势 $e(t)$ 和电流 $i(t)$ 的大小由零到最大再到零, 但始终为负值, 电流 $i(t)$ 的方向是自 D 点起经 C 及 B, 至 A 点。这种变化规律用数学语言描述: $e(t)$ 、 $i(t)$ 是以时间 t 为自变量的正弦函数。用公式表示为

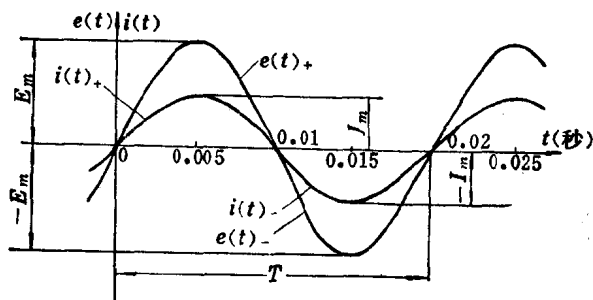
$$e(t) = E_m \sin \omega t \quad (1-1)$$

$$i(t) = I_m \sin \omega t \quad (1-2)$$

在图1-2(b)中, 交流电正弦波形随着时间的推移是不断重复的。正弦交流电可用下列几个参数来说明它的特点。



(a)



(b)

图 1-2 简单交流电路
(a) 电路图, (b) 正弦波形图

1. 瞬时值及振幅

某瞬间交流电的实数值称为瞬时值。公式(1-1)、(1-2)中的 $e(t)$ 及 $i(t)$ 分别为电动势及电流的瞬时值, 瞬时值一般用小写字母表示。

交流电的瞬时值虽然变化, 但总在零至极大值之间变

化，这个极大值称为振幅。公式(1-1)、(1-2)中的 E_m 及 I_m 分别为交流电动势及电流的振幅，振幅一般用大写字母加注脚 m 表示。

2. 周期、频率及角频率

交流电变化一个循环所需要的时间，称为周期，用大写字母 T 表示，如图1-2(b)中所示，单位是秒。

每秒钟内交流电变化的周期数称为频率，用小写字母 f 表示，单位是周/秒（即赫芝Hz）。

从公式(1-1)(1-2)中看到，交流电按正弦函数变化一个周期相当于变化了 2π （即角度 360° ）弧度。因此，用角频率 ω 来表示交流电变化的快慢更方便； ω 的单位是每秒弧度数。

根据周期和频率的定义，它们恰好互成倒数关系，即

$$f = \frac{1}{T}$$

角频率 ω 和周期 T 、频率 f 间的关系为：

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

我国电力网供给的交流电频率（简称工频）是50赫，它的周期是0.02秒。反映声音信号的频率（简称音频）大约为20赫到20000赫。无线电方面应用的频率则较高，例如中央人民广播电台的载波（或发射）频率，在中波段有540千赫，在短波段有11290千赫等。电视台的发射频率则更高。

3. 相位、初相和相位差

交流电的正弦波形是连续变动的，一般说来没有肯定的起点或终点；但有时为了区别不同的正弦波形，往往需要选择一个计算时间的起点或计算的起始角，例如我们写

$$e_1 = E_{m1} \sin(\omega t + \psi_1) \quad (1-3)$$

$$e_2 = E_{m2} \sin(\omega t + \psi_2) \quad (1-4)$$

则公式(1-3)、(1-4)同样可画出二个正弦波形,如图1-3所示。它们的 $(\omega t + \psi_1)$ 、 $(\omega t + \psi_2)$ 和公式(1-1)中的 ωt 反映这些正弦波形变动的进程,决定着交流电瞬时值的大小和正负。因此称 ωt 、 $(\omega t + \psi_1)$ 、 $(\omega t + \psi_2)$ 等等为正弦量的相位。因为相位是用角度来表示的,所以又称它们为相位角。

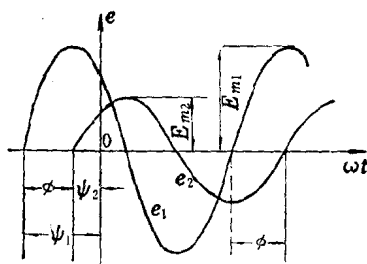


图 1-3 同频不同初相位的正弦波

当假定计算时间的起点为 $t = 0$ 秒时,上述三式的相位角分别为 0 、 ψ_1 、 ψ_2 ,我们称这三个角度分别为这三个正弦波电动势的初相位或初相角,简称初相。初相反映了正弦量的起始值,即 $t = 0$ 秒时正弦波的瞬时值,以公式(1-1)、(1-3)为例,则为

$$e(t) \Big|_{t=0} = E_m \sin \omega t = E_m \sin 0^\circ = 0$$

$$e_1 \Big|_{t=0} = E_{m1} \sin(0 + \psi_1) = E_{m1} \sin \psi_1$$

频率相同的正弦交流电,它们相位间的差别称为相位差,用 ϕ 表示,在图1-3中为

$$\phi = (\omega t + \psi_1) - (\omega t + \psi_2) = \psi_1 - \psi_2 \quad (1-5)$$

由此可见，同频率正弦波间的相位差在任何瞬间都是一个常数，即等于初相位之差。如果 $\phi = \psi_1 - \psi_2 > 0$ ，我们说 e_1 的相位领先（或超前）于 e_2 的相位一个角度 ϕ ，简称 e_1 领先 e_2 ，意思是说 e_1 比 e_2 先达到正的极大值（或零值）。也可以反过来说 e_2 滞后（或落后）于 e_1 一个角度 ϕ 。

从上所述可以看到，正弦交流电的特征表现为正弦量的大小，变动的快慢及初始值三个方面，而它们可以由振幅、频率（或角频率）和初相来确定。因此把振幅、频率和初相称为正弦交流电的三要素，它们是正弦量之间互相区别的依据。

4. 正弦交流电的有效值

交流电的瞬时值是时间的函数，它的大小和方向是随时间变化的。为了简便而又正确反映这个交流电的大小，我们从它作功（转化成热能）的效应来考虑，采用它的有效值来表示。

什么是有效值呢？如果一个交流电通过一个电阻在一个周期内消耗的能量与某直流电通过同一电阻，在同样的时间里，消耗的能量相等，那么该直流电的大小就称为这个交流电的有效值。交流电动势和电流的有效值，分别用大写字母 E 和 I 来表示。

实验和计算可以证明：一个交流电的有效值和它的最大值之间的关系为

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

日常生活中照明用交流电的电压为220伏，就是指它的有效值为220伏，而它的最大值为311伏。

第二节 电阻、电感和电容元件

日常生活中的电气设备、电器用具，其电路比较复杂。但从交直流电路的角度看，可以把这些设备、电路分成两大类：一是电源元件，如发电机、电池等；二是负载元件，其中包括电阻、电感和电容。

白炽灯泡或电炉等把电能转化成热能或光能的电器可用电阻元件 R 表示，如图1-4(a)所示。电感元件 L 如图1-4(b)所示，是电能和磁场能互相转换的元件；日光灯及小容量电动机等不仅要把电能转换成光能、热能及机械能，而且需要建立磁场，因此这类电器可用一个 R 及 L 相串联的电路如图1-4(d)来表示。图1-4(c)所示电容元件是把电能和电场能互相转换的元件；晶体管收音机的接收天线，是用磁棒（上面绕有电感线圈 L_1 及 L_2 ）和可以调节的电容 C 组成，如图1-4(e)所示。还可以举出很多电路实例，都可以用 R 、 L 、 C 的

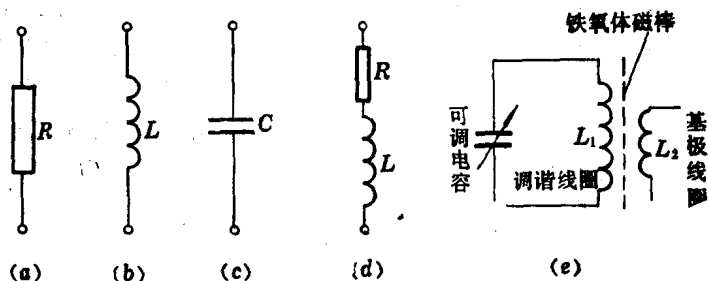


图 1-4 电阻、电感和电容元件的符号
(a)电阻，(b)电感，(c)电容，(d)RL串联，(e)LC并联

组合来表示。下面介绍这些元件的物理性能。

一、电阻元件 R

凡使电能不可逆转地转变为热能、光能、机械能和其它形式能量的器件，都用电阻元件 R 代表。

直流电流 I 流过电阻 R ，要产生电压降落 U_R ，这三者之间的关系便是欧姆定律，即

$$U_R = IR \quad (1-6)$$

这时电阻上消耗的功率为

$$P_R = U_R I = I^2 R = \frac{U_R^2}{R} \quad (1-7)$$

这个电阻 R 在时间 t 秒内消耗的电能为

$$A = P_R t = U_R I t = I^2 R t$$

上述各物理量的单位是

R —— 欧姆 (Ω) 或千欧 ($k\Omega$);

I —— 安培 (A) 或千安 (kA);

U_R —— 伏特 (V) 或千伏 (kV);

P_R —— 瓦特 (W) 或千瓦 (kW)。

同样，正弦交流电流 $i = I_m \sin \omega t$ 流过电阻 R 时，也要产生正弦交流电压降落 $u_R = U_{mR} \sin \omega t$ ，如图 1-5(a) 所示。它们都有方向，即前半个周期中 ($0-180^\circ$)，电流 i 由 A 点流向 X 点，电压 u_R 的方向是 A 点的电位高于 X 点；在后半个周期中 (由 180° 至 360°)，电流 i 由 X 点流向 A 点， u_R 的方向是 X 点的电位高于 A 点，在波形图上表示 i 和 u_R 都是负值 (前半个周期都为正值)，如图 1-5(b) 所示。 R 、 i 及 u_R 三者间的关系用数学公式表示为

$$\text{瞬时值} \quad u_R = Ri = RI_m \sin \omega t = U_{mR} \sin \omega t \quad (1-8)$$

$$\text{最大值} \quad U_{mR} = RI_m$$