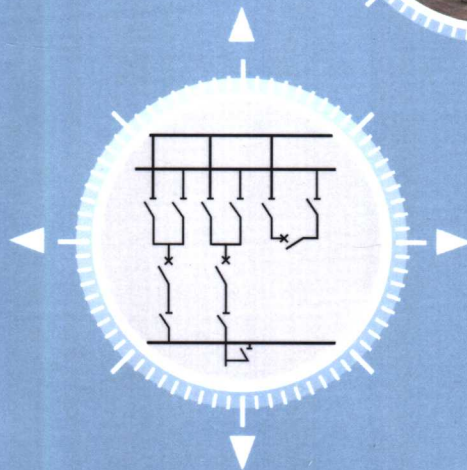


变电运行事故分析及处理

● 廖自强 余正海 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

变电运行事故分析及处理

廖自强 余正海 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是针对变电站现场运行人员的有关变电运行事故分析及处理知识的培训教材。全书分为两大部分,第一部分是有关变电站故障运行分析、处理的基础理论、专业理论知识的简要介绍,主要讲解了电气元件的特性和变电站设备及保护的基本知识;第二部分介绍了变电站事故分析、处理的原则、方法并举例说明了变电站运行典型事故的现象、可能原因以及分析、查找、处理故障的办法。

本书既可以作为变电站运行人员的培训教材,也可以作为其提高业务水平的参考书,同时可供大中专院校相关专业师生学习、参考。

图书在版编目(CIP)数据

变电运行事故分析及处理/廖自强,余正海编. —北京:
中国电力出版社, 2004

ISBN 7-5083-1791-2

I. 变… II. ①廖…②余… III. ①变电所-电力系统运行-事故分析-技术培训-教材②变电所-电力系统运行-事故-处理-技术培训-教材 IV. TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 098161 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>)

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

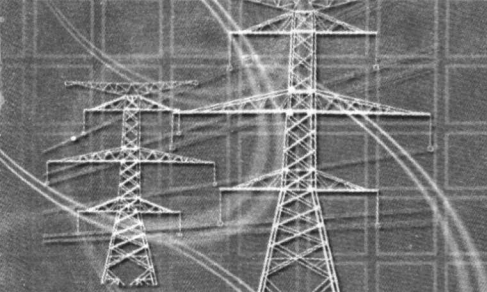
2004 年 1 月第一版 2004 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 12 印张 266 千字

印数 0001—5000 册 定价 20.00 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

保证变电站的安全稳定运行,对电力系统的安全和稳定具有重要意义。变电站一旦发生故障,如不能及时消除,会酿成大面积停电,将给社会带来灾难性后果。因此,提高变电站运行人员的分析处理故障能力,使运行人员能够有效防范事故发生,能够在事故发生后,准确地向调度部门汇报事故信息,正确处理,是保证电网安全的一项重要工作。本书是专为变电站运行人员进行事故分析和处理而编写的培训教材。

本书首先介绍了进行变电运行事故分析及处理中常用专业基础知识,在此基础上叙述了变电运行管理、变电运行事故及异常处理原则输电线路异常及故障分析处理、变压器异常及故障分析处理、母线设备异常及故障分析处理、小电流接地系统接地查找及处理、站用交直流系统异常及故障分析处理,以及保护及自动装置异常及故障分析处理。在本书最后部分,还列举了变电站典型事故的实例及分析和误操作事故典型事例,并对变电站综合自动化系统进行了简要介绍。本书力求结合实际变电站运行中常出现的典型事故和异常情况,从问题的基础知识、基础理论出发,分析事故的来龙去脉,将理论和实际有机结合,达到先进而实用的目的。

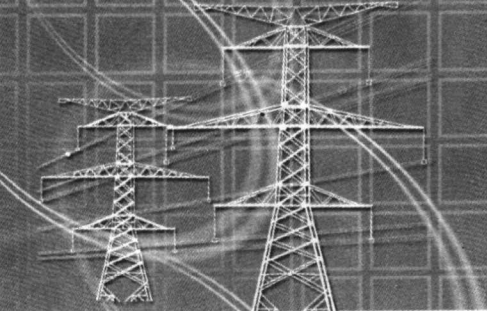
本书在编写过程中得到了众多技术人员和工程人员的帮助,在此表示感谢。

由于编者经验水平有限,书中难免有疏漏之处,恳请广大读者和各方面专家提出宝贵意见,使本书不断完善,真正起到提高电力职工技能水平的作用。

编者

2003年10月

QA 273/1



目 录

前言

第一章	变电运行事故分析常用专业基础知识	1
第一节	电工电子基础知识	1
第二节	电力系统基础知识	22
第三节	隔离开关结构及原理	29
第四节	断路器结构及原理	33
第五节	互感器结构及原理	44
第六节	变压器结构及原理	51
第七节	典型主接线方式及站用接线方式	53
第八节	继电保护及自动装置	59
第九节	站用直流系统	72
第二章	变电运行管理	76
第一节	变电站运行人员的工作职责	76
第二节	变电站各级人员岗位责任制	76
第三节	运行人员对变电站设备的运行管理范围划分	77
第四节	调度管理	78
第五节	变电站巡回检查及交接班制度	79
第六节	变电站的运行维护制度	80
第七节	变电站规范化倒闸操作	81
第三章	变电运行事故及异常处理原则	91
第一节	事故及异常处理的一般原则	91
第二节	异常及事故处理的注意事项	92
第四章	输电线路异常及故障分析处理	95
第一节	系统异常及故障	95
第二节	输电线路故障跳闸	96
第三节	断路器的异常及故障	101
第四节	失灵保护跳闸	109
第五节	系统频率电压降低的异常处理	111

第五章	变压器异常及故障分析处理	112
第一节	变压器故障跳闸	112
第二节	变压器异常及轻瓦斯报警	114
第三节	变压器冷却器异常	116
第四节	变压器油流故障	118
第五节	变压器温度升高	118
第六节	变压器有载调压装置故障	119
第七节	充油设备油位异常	120
第六章	母线设备异常及故障分析处理	121
第一节	隔离开关机构异常	121
第二节	一次设备过热	121
第三节	母线跳闸	122
第四节	母线谐振	123
第五节	母线失压	124
第七章	小电流接地系统接地的查找及处理	125
第一节	小电流接地系统的运行特点	125
第二节	小电流接地系统接地的查找	125
第八章	站用交直流系统异常及故障分析处理	127
第一节	站用交流消失	127
第二节	中央信号异常及处理	128
第三节	直流电压消失	129
第四节	直流系统接地	130
第九章	保护及自动装置异常及故障分析处理	132
第一节	交流电流回路故障	132
第二节	交流电压回路故障	133
第三节	互感器本体异常及故障	134
第四节	保护装置异常及故障	135
第五节	保护高频通道异常及故障	136
第六节	收发信机异常处理	137
第七节	微机故障录波及测距装置异常处理	139
第八节	越级跳闸	142

第十章	变电站故障处理实例分析	144
第一节	主变压器断路器越级跳闸	144
第二节	保护装置异常	154
第三节	10kV 系统单相接地	155
第四节	断路器机构异常	157
第五节	母线故障	158
第六节	站用电系统故障	160
第七节	电流电压回路故障	161
第八节	主变压器故障	162
第九节	线路故障	164
第十一章	误操作事故典型事例	165
第十二章	变电站综合自动化系统简介	175

第一章 变电运行事故分析常用专业 基础知识

第一节 电工电子基础知识

一、电路的基本概念及基本元件

1. 电路和电路图

(1) 电路。电路是人们根据需要，用导体及导体构成的部件相互联接而形成的电流路径的总体，也称之为电网络。

(2) 电路构成。构成电路的元件多种多样，但就其功能而言，可分为三类，即电源、负载和连接导线。

(3) 电路图。由代表电路元件的符号相互联结构成的图形称为电路图，简单电路图如图 1-1 所示，常见的电路有直流电路和交流电路。

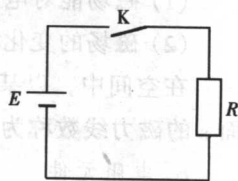


图 1-1 简单电路图

2. 电荷与电场

电荷周围空间存在电场，称为库仑电场。电场对电荷能施以力的作用。静电场是一个有源场，也是一个位场。点电荷的电场如图 1-2 所示。

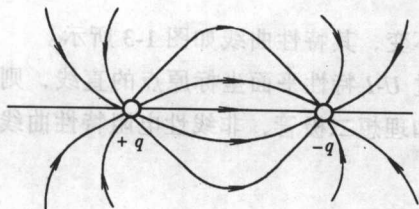


图 1-2 点电荷的电场

3. 电流

电流离不开电场的作用。电流可分两类，一类是由电荷的定向移动形成的电流，包括传导电流和对流电流；一类是由变化的电场所形成的电流，称之为位移电流。

(1) 传导电流。传导电流是导电媒质（如金属导线、电解液）中的自由电子或离子在电场力的作用下的定向运动而形成的电流。

(2) 对流电流或运流电流。对流电流或运流电流是由带电体在自由空间运动所形成的电流，真空管中的电流就是这种电流。

(3) 位移电流。位移电流是由电场变化引起的电流。

(4) 电流的单位。单位时间内穿过截面 s 的电荷量称为电流强度，简称电流。其方向规定为正电荷流动的方向。电流的基本单位为安培 (A)，其常用单位还有千安 (kA)，毫安 (mA) 和微安 (μA)。

$$1\text{kA} = 1000\text{A}; 1\text{A} = 1000\text{mA}; 1\text{mA} = 1000\mu\text{A}$$

4. 电位与电压

电位是一个相对的量，在一定的电场中，其值的大小决定于参考点的选择。物理学中

一般以无限远处作为参考点，而在电路中一般以接地点作为参考点。某点的电位指的是单位正电荷在库仑电场的作用下，从这一点移至参考点电场力所做的功。

电位差也称为电压，即指电场力将单位正电荷从 a 点经任意路径移至 b 点所做的功，场中两点的电位差与参考点的选择无关。

电压的基本单位为伏特 (V)，其常用单位还有千伏 (kV)，毫伏 (mV) 和微伏 (μV)。

$$1\text{kV} = 1000\text{V}; 1\text{V} = 1000\text{mV}; 1\text{mV} = 1000\mu\text{V}$$

在非库仑场中 (如在蓄电池内部)，由于存在化学力的作用，使电荷产生定向移动，我们把这种力使正电荷从负极移至正极所做的功，定义为电动势，通常用 E 或 e 表示，其单位也是 V。

需要注意的是，电动势的方向一般由负指向正，而电压的方向规定为由正指向负。

5. 磁通链

电流和磁场是不可分割的，磁场的基本特征是：

- (1) 磁场能对电流体施以力的作用。
- (2) 磁场的变化将出现感应电场。

在空间中，以某一闭合轮廓为边界构成的面称为闭合轮廓界定的面，磁力线穿过界面 s 的磁力线数称为与该闭合轮廓交链的磁通，以 ϕ 表示，磁通的总和称为磁通链。

6. 电阻元件

导体对电流的阻碍作用称为电阻。电阻分为线性电阻和非线性电阻两类。

- (1) 线性电阻。线性电阻满足关系式

$$R = U/I$$

线性电阻任何时刻在 $U-I$ 特性平面上的特性曲线不变，其特性曲线如图 1-3 所示。

(2) 非线性电阻。若电阻元件的特性曲线不是通过 $U-I$ 特性平面坐标原点的直线，则称该元件为非线性电阻元件。如二极管、隧道二极管和理想二极管，非线性电阻特性曲线如图 1-4 所示。

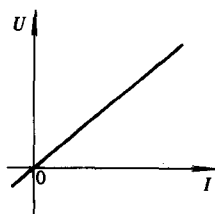


图 1-3 线性电阻
特性曲线

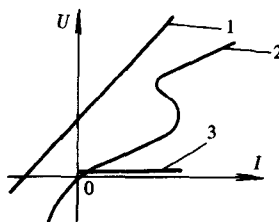


图 1-4 非线性电阻特性曲线
1—二极管；2—隧道二极管；
3—理想二极管

7. 电容元件

电容元件是储存电荷 (电场) 的元件。通常的电容元件是线性时不变元件，满足以下关系式

$$C = \frac{q(t)}{u(t)}$$

电容的基本单位为法拉 (F)，常用的单位还有微法 (μF) 和皮法 (pF)。

$$1\text{F} = 10^6\mu\text{F}; 1\mu\text{F} = 10^6\text{pF}$$

电容元件是储能元件，由于它只能将储存的能量释放出去，而不能放出多于充电时储存的能量，所以也是一种无源元件。

在电力网中，电容元件得到广泛应用，如输电线路相对地、相对相之间电容以分布形式存在；电网的补偿装置多采用并联电容补偿、串联电容补偿方式等。在直流回路中，电容元件相当于开路，而在交流回路中，电容元件才表现其电容的特点。

电容的端电压与电流有如下关系

$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt}$$

可以看出：电容电流与电压对时间的导数成正比，即某一时刻的电流与同一时刻的电压的变化率成正比；另外，上式也表现出某一时刻的电容电压不仅决定于初始电压和同一时刻的电流，还与初始的电流有关，电容的这种性质称为电容元件的记忆作用，即电容是一种记忆元件。

电容元件的另一个重要性质是电容元件端电压的连续性特性，电容元件在放电和充电过程中，端电压随时间而变化，且电压的变化是连续的。用一句话概括，即电容的端电压是不能突变的。

8. 电感元件

电感是线圈或导体中流过交变电流产生的一种特有现象，它体现了此类元件对交变电流的一种阻碍作用。电感的大小为线圈或导线的自感磁链 ψ 和所通过电流 i 之比，即

$$L = \frac{\psi}{i}$$

电感的基本单位为亨利 (H)，常用单位还有毫亨 (mH)。

$$1\text{H} = 1000\text{mH}$$

电感元件是一种储能元件，它储存磁通 (磁场)，并且电感元件所放出的能量只能等于初充电时储存的能量，因此是无源元件。

电感元件被广泛应用于电力网中，如变压器，电抗器等，它主要完成磁电转换，限流的功能。在直流回路中，电感元件相当于短路，只有在交变回路中，它才表现出电感的特性。电感的端电压与电流有如下关系

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

从公式中我们可以看出：电感电压是与电流对时间的导数成正比的，即某时刻的电压与同一时刻的电流变化率成正比，某时刻的电感电流不仅决定于初始电流和同一时刻的电压，而且与初始的电压有关，电感也是一种记忆元件。

电感元件同电容元件一样，其电流具有连续性特性，即电感元件在放电和充电过程中，电流随时间而变化，且电流的变化是连续的。用一句话概括，即电感的电流是不能突



变的。

9. 基尔霍夫电流电压定律

(1) 基尔霍夫电流定律 (KCL)。对于电路中的任一节点或任一封闭面, 在任一时刻, 流出(流入)节点(封闭面)的全部支路电流的代数和为零, 这称为基尔霍夫电流定律 (KCL), 它与支路元件的性质无关, 仅决定于电路的几何结构, 一般表示为

$$\sum i(t) = 0$$

(2) 基尔霍夫电压定律 (KVL)。对于电路中的任一闭合回路, 在任一时刻, 沿闭合回路的绕行方向所有相关支路电压的代数和为零, 这称之为基尔霍夫电压定律 (KVL), 它与支路元件的性质无关, 仅决定于电路的几何结构, 一般表示为

$$\sum u(t) = 0$$

二、简单电路

电路中支路电压和电流的关系由支路元件的特性所决定, 而各支路电压和电流的关系受 KCL 和 KVL 的约束。上述元件特性和 KCL、KVL 是分析电路的依据和出发点。电路的基本构成有以下几种:

(1) 串联。若干个元件联接成无分支的电路称为串联连接。若通以电流, 则串联电路中的各元件通过同一电流。

1) 电阻元件串联。电阻 R_1 、 R_2 串联, 总电阻 $R = R_1 + R_2$

2) 电容元件串联。电容 C_1 、 C_2 串联, 总电容 $1/C = 1/C_1 + 1/C_2$

3) 电感元件串联。电感 L_1 、 L_2 串联, 总电感 $L = L_1 + L_2$

(2) 并联。若干个元件的两端分别连接在一起的连接方式称为并联连接。若施加电压, 则每一元件承受同一电压。

1) 电阻元件串联。电阻 R_1 、 R_2 并联, 总电阻 $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$

2) 电容元件串联。电容 C_1 、 C_2 并联, 总电容 $C = C_1 + C_2$

3) 电感元件串联。电感 L_1 、 L_2 并联, 总电感 $1/L = 1/L_1 + 1/L_2$

(3) 混联。既含元件的串联, 又含元件的并联的联接方式称为混联。混联的形式很多, 它构成了各种复杂电路。电阻 R_2 、 R_3 并联后与电阻 R_1 串联, 总电阻 $R = R_1 + R_2 // R_3$

三、电路重要定理

(1) 替代定理。任一网络中的任一无耦合的支路, 电压为 $u(t)$, 电流为 $i(t)$, 将其支路用具有电压波形 $u(t)$ 的电压源, 或电流波形为 $i(t)$ 的电流源来替代, 只要原网络和替代后的网络具有唯一解, 则两网络任一一对应的支路有相同的电压和电流。

(2) 叠加定理。在任一线性网络中, 所有激励共同作用下的总响应, 为各个激励单独作用时所得响应的代数和。

(3) 等效电源定理。等效电源定理是电路计算中应用最多的定理之一, 常的等效电路有戴维南等效电路和诺顿等效电路。

1) 戴维南等效电路。线性有源一端口网络 Π 对外网络而言, 可以用一电压源和与其相串联的等效电阻来代替。戴维南等效电路如图 1-5 所示。



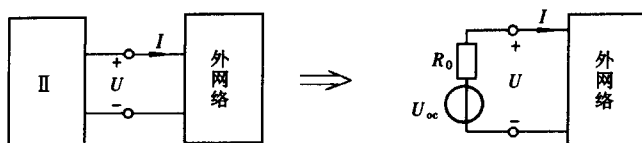


图 1-5 戴维南等效电路

2) 诺顿等效电路。线性有源一端口网络 II 对外网络而言，可以用一电流源和与其相并联的等效电阻来代替。诺顿等效电路如图 1-6 所示。

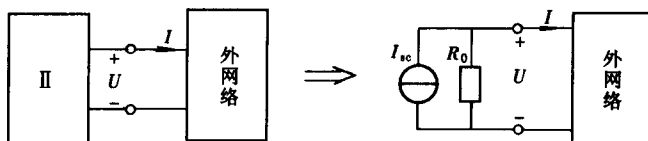


图 1-6 诺顿等效电路

四、电阻网络分析

线性网络的分析是整个网络分析的基础，它为一般网络分析提供了分析方法和依据，其关键是列写正确的网络方程。常用的方法是支路分析法、节点分析法、等效简化法等。

1. 支路分析法

以支路电压、电流为待求量，列写足够的、独立的 KCL、KVL 方程式和支路特性方程式的方法，称为支路分析法，支路分析法电路如图 1-7 所示。

选取支路电流的方向，如图 1-7 中 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 所示。

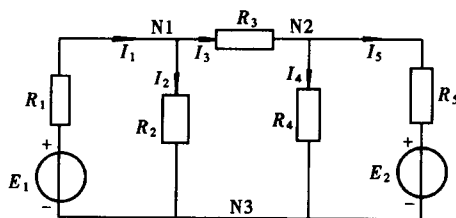


图 1-7 支路分析法电路

选取独立节点 N1、N2，列写 KCL 方程

$$I_1 = I_2 + I_3$$

$$I_4 = I_3 + I_5$$

选取网孔独立回路，列写 KVL 方程

$$R_1 I_1 + R_2 I_2 = E_1$$

$$-R_2 I_2 + R_3 I_3 + R_4 I_4 = 0$$

$$R_4 I_4 + R_5 I_5 = E_2$$

联立求解以上 5 个方程，即可求出 5 个未知支路的电流和电压大小。

支路分析法（支路电流法和支路电压法）联立求解所需要的方程式数等于支路数，当支路数增多时，计算量会增大。

2. 节点分析法

以节点电位为未知量列写方程式的方法，称为节点分析法，节点分析法电路如图 1-8 所示。

先列写电导矩阵

$$G_n = \begin{bmatrix} 2 & -1/2 \\ -1/2 & 7/6 \end{bmatrix}$$

设独立节点 N1、N2 的电压为 U_1 、 U_2 则

$$\begin{bmatrix} 2 & -1/2 \\ -1/2 & 7/6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 \\ 2 \end{bmatrix}$$

根据节点电位即可求出回路电压和各支路的电流。

3. 等效电路化简法

采用等效电路化简法的目的是使电路简化，便于计算求解。对复杂的电路一般需要逐步化简，这种用等效电路将电路逐步简化求解的方法称为等效电路化简法。

常用的化简方法为 Y- Δ 转换法，如图 1-9 所示。

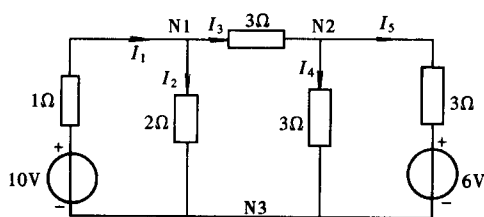


图 1-8 节点分析法电路

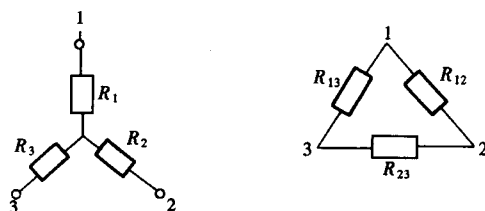


图 1-9 星/三角转换法

$\Delta \rightarrow Y$ 变换的公式为

$$R_1 = R_{12} R_{13} / (R_{12} + R_{23} + R_{13})$$

$$R_2 = R_{12} R_{23} / (R_{12} + R_{23} + R_{13})$$

$$R_3 = R_{13} R_{23} / (R_{12} + R_{23} + R_{13})$$

$Y \rightarrow \Delta$ 变换的公式为

$$R_{12} = (R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1) / R_3$$

$$R_{23} = (R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1) / R_1$$

$$R_{13} = (R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1) / R_2$$

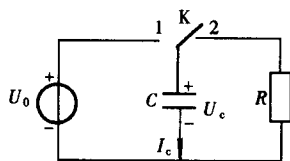


图 1-10 RC 电路零输入
响应电路图

RC 电路的零输入响应电路图如图 1-10 所示，原开关接在 1 端，在 $t = 0$ 时刻瞬时接至 2 端，形成电容的放电过渡过程，电容上的电压、电流值分别为

$$u_c(t) = U_0 e^{-t/\tau}$$

五、一阶电路、二阶电路和正弦交流电路

含有动态元件电容、电感的电路称为动态电路。由于动态电路中存在动态元件，因而有着不同于电阻网络的特性。动态电路的分析就是分析电路中由于电源的切断、元件参数的改变、电路结构的改变所引起的动态过程（过渡过程）。

1. 一阶电路零输入响应

$$i_c(t) = \frac{U_0}{R} e^{-t/\tau}$$

$$\tau = RC$$

由上述计算可以看出：

(1) 电容瞬时断电后，电容内仍然储存电能，电容电压必须通过放电回路放电。

(2) 电容放电是一个动态过程，放电时间的长短决定于 τ ，而 τ 的大小由回路的 R 、 C 决定。

(3) 在电网中，存在分布电容的输电线路、电容补偿装置在断电后同样表现上述回路的特点。

(4) 在电网中，当电源电压突然降低时，电容将逐步放电，电压将有渐变的一动态过程。电容补偿器在系统电压降低时向系统补充无功，起到维持电压的作用。

RL 电路放电也与上述相类似的动态过程，读者可自行分析。

2. 一阶电路零状态响应

RC 电路的零状态响应电路图如图 1-11 所示，原未充电的 RC 电路接通直流电压源的电路，开关 K 在 $t = 0$ 时刻接通电源，形成电容的充电过程，电容上的电压、电流值分别为

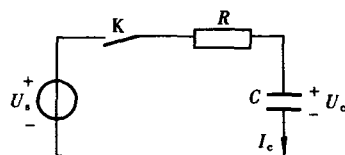


图 1-11 RC 电路零状态响应电路图

$$U_c(t) = U_s (1 - e^{-t/\tau})$$

$$I_c(t) = \frac{U_s}{R} e^{-t/\tau}$$

$$\tau = RC$$

由上述计算可以看出：

(1) 电容由零状态充电时，电容将储存电能，电容电压 $t = 0$ 时刻为零，逐步充电到电源电压。

(2) 电容充电是一个动态过程，充电时间的长短决定于 τ ，而 τ 的大小由回路的 R 、 C 决定。

(3) 在电网中，存在分布电容的输电线路、电容补偿装置在充电过程中表现上述回路相同的特点。

(4) 在电网中，当电源电压突然升高时，电容将逐步充电，电压将有渐变的动态过程。电容补偿器在系统电压升高时从系统吸收无功，起到维持电压的作用。

RL 电路充电也与上述相类的动态过程，读者可自行分析并得出结论。

3. 一阶电路的全响应

电路在外加激励和初始储能共同作用下引起的响应，称为全响应。全响应为零输入响应和零状态响应的叠加。

以电源为正弦交流电为例，一阶电路全响应电路图如图 1-12 所示，设

$$U_s = U_m \sin(\omega t + \psi)$$



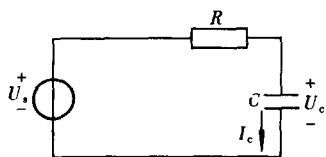


图 1-12 一阶电路全响应

电容 C 上初始电压为 U_0 ，则

$$u_c(t) = U_{sm} \sin(\omega t + \theta) + (U_0 - U_{sm} \sin \theta) e^{-t/\tau}$$

$$i(t) = \omega C U_{sm} \cos(\omega t + \theta) + \left(\frac{U_{sm}}{R} \sin \theta - \frac{U_{sm}}{R} \right) e^{-t/\tau}$$

由所得结果可知：全响应可分为强制分量（稳态分量）和自由分量（暂态分量）两部分。

上述分析表明：

(1) 在包含储能元件的电路中，电路结构的突变将引起过渡过程，电流、电压参数中出现随时间衰减的暂态分量。

(2) 正弦交流电源构成的回路中，暂态分量为非周期分量。

(3) 在电网中，线路停、送电、短路、发电机强励等情况下，电网的结构发生了突变，电网中会出现与上述分析相同的过程，即暂态过渡过程，只不过实际情况要比上述电路复杂得多。

4. 一阶电路的全响应的三要素法

对于阶跃激励、正弦激励等稳定状态易求的电路，计算一阶电路的全响应可不必列写电路的微分方程式，直接用三要素法，即求得稳态分量、初始条件和时间常数，公式为

$$y(t) = y_{\infty}(t) + [y(0) - y_{\infty}(0)] e^{-t/\tau}$$

式中 $y(t)$ ——全响应；

$y_{\infty}(t)$ ——稳态响应；

$y_{\infty}(0)$ ——稳态响应的初值；

$y(0)$ ——响应的初值。

5. 正弦交流的分析方法

(1) 正弦交流的概念。凡电压、电流、电动势等电量均按时间做正弦变化，统称为正弦交流电。正弦交流电电压波形如图 1-13 所示，电压的瞬时表达式为

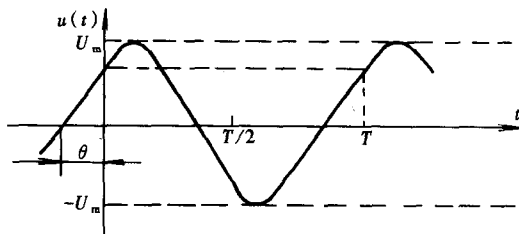


图 1-13 正弦交流电电压波形

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \theta)$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$f = 1/T$$

式中 U_m ——电压的极大值，又称振幅、幅值；

T ——完成 1 个周期需花的时间，称为周期；

f ——频率，为周期的倒数；

θ ——初相角。

正弦交流电的振幅、频率和初相角是构成正弦交流电的三要素。知道了这三要素，正弦交流电的表达式就唯一确定了。

两个正弦量，若频率相同，但初相角不同，其相角差等于初相角之差，与时间无关。称先达到最大值的正弦量为超前，后达到的为滞后。但“超前”、“滞后”只反映各个物理

量变化的进程，并不是指它们发生或出现的先后。

通常用正弦交流电的有效值来进行测量和计算，所谓有效值是指在一个周期的时间间隔里，与交流电有相同的热（或光、机械力）效应的直流电的数值，其表达式为

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt}$$

由上式看出，交流电的有效值是其均方根值，对于一般交流电流表、电压表，若无特殊声明，其读数均为有效值。

(2) 相量表示法。一个正弦向量 $i(t) = I_m \sin(\omega t + \theta)$ 可以与一个矢径为 $1.41I$ ，初相角为 θ ，以角速度 ω 按逆时针方向旋转的矢量在虚轴上的投影相对应，而这个旋转矢量可用复数来表示，这就是正弦交流电的相量表示法，如图 1-14 所示。表示相量的几何图形称为相量图。

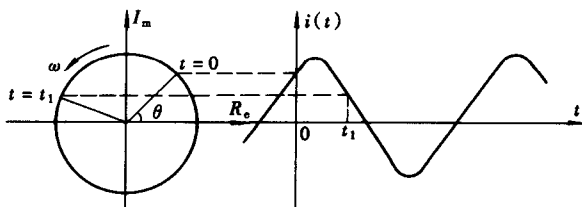


图 1-14 相量表示法

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \theta) \Leftrightarrow \dot{I} = I \angle \theta$$

(3) R 、 L 、 C 元件的正弦电压和电流。

1) 电阻元件。根据欧姆定理，有

$$u_R(t) = Ri(t)$$

$$i(t) = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \theta)$$

$$u_R(t) = Ri(t) = \sqrt{2} IR \sin(\omega t + \theta) = \sqrt{2} U_R \sin(\omega t + \theta)$$

$$U_R = IR$$

式中 U_R ——电阻电压的有效值；

I ——电阻电流的有效值。

电阻的电压与电流是同频率同相位的正弦波，电阻元件的相量表示如图 1-15 所示，其表达式为

$$\dot{U}_R = \dot{I} R$$

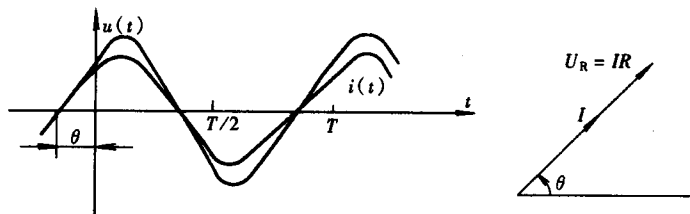


图 1-15 电阻元件的相量表示

2) 电感元件。根据电感的特性方程，有 $u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt}$

$$\text{若 } i(t) = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \theta)$$

$$u_L(t) = \sqrt{2} U_L \sin(\omega t + \theta + \pi/2)$$

$$U_L = \omega L I$$

式中 I ——电感电压和电流的有效值。

电感的电压与电流频率相同，而相位方面，在参考方向一致的情况下，电压超前电流 90° ，电感元件的相量表示如图 1-16 所示，其表达式为

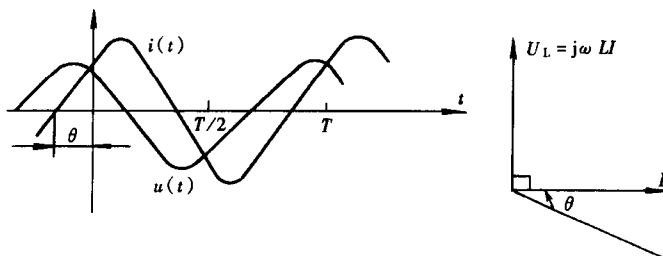


图 1-16 电感元件的相量表示

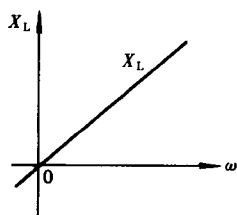


图 1-17 电感频率特性

$$\dot{U}_L = j\omega L \dot{I}$$

$$j = \angle \pi/2 = e^{j\pi/2}$$

式中 j ——旋转算子。

一个相量乘以 j ，相当于将该相量逆时针旋转 90° ， $X_L = \omega L$ 称之为电感的电抗，简称感抗，电感频率特性如图 1-17 所示，从感抗的频率特性可看出，电感元件的感抗随频率的增加而增大。

3) 电容元件。根据电容的特性方程，有

$$i_c(t) = C \frac{du_c(t)}{dt}$$

$$\text{若 } u_c(t) = \sqrt{2} u_c \sin(\omega t + \theta)$$

$$i_c(t) = \sqrt{2} \omega C U_c \sin(\omega t + \theta + \pi/2)$$

$$I_c = \omega C U_c$$

式中 U_c ——电容电压的有效值；

I_c ——电容电流的有效值。

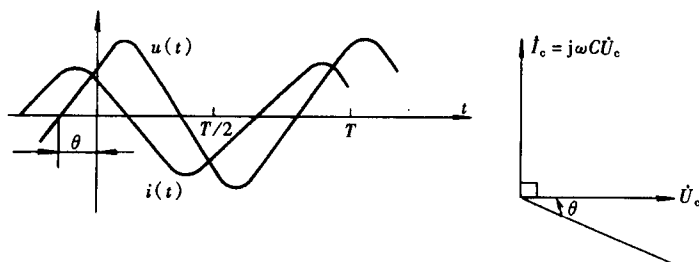


图 1-18 电容元件的相量表示