

全国电力职业教育规划教材

输电线路 运行与维护基础

三峡大学 文 中 主 编
长治供电公司 赵晓明 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

全国电力职业教育规划教材

输电线路 运行与维护基础

主 编 文 中

副主编 赵晓明

编 写 高虹亮 孟遂民 陈祥和 李光辉

唐 波 邓长征 刘 民 黄 力

主 审 张永斌 郭芳霞 史振华 张振平



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书系统地介绍了输电线路的组成和基础理论知识,以及输电线路常见故障与预防、线路缺陷判断与评定等管理知识,并介绍了从事输电线路运行与检修维护工作常用的科学实用技术和新技术。全书共分九章,其主要内容包括电工学基础、电力系统基本知识、高电压技术基础、继电保护基本知识、架空线路力学计算、杆塔受力分析计算、输电线路检修施工与运行维护、输电线路常见故障及预防、输电线路无损检测与在线监测技术。

本书作为输电线路专业一线生产人员的培训教材,可作为国家电网公司从事输电线路运行检修与维护管理的线路专工、管理干部培训用书,也可供高职高专输电线路专业学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

输电线路运行与维护基础/文中主编. —北京:中国电力出版社, 2012. 9

全国电力职业教育规划教材

ISBN 978-7-5123-3473-1

I. ①输… II. ①文… III. ①输电线路—继续教育—教材
IV. ①TM726

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 213970 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 9 月第一版 2012 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 20.75 印张 505 千字

定价 42.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

为满足供电企业输电线路专业人员培训教学需要，三峡大学电气与新能源学院及长治供电公司输电工区工程技术与管理人人员，根据多年来工作的实践与经验编写了《输电线路运行与维护基础》一书。本书阐明了输电线路科学技术领域中的一些基础理论知识、原理和运行检修、维护管理的常用知识与实用技术，具有一定的理论性、针对性、实用性，是输电线路专业工程技术人员和在校学生从事运行检修及维护管理较实用的教程和参考书。

本书共分九章。第一至四章介绍了输电线路的组成和基础理论知识；第五至九章介绍了输电线路工程技术与管理人人员从事实际工作常用的实用技术，以及输电线路常见故障与预防、线路缺陷判断与评定等管理知识。

本书由三峡大学电气与新能源学院文中担任主编，长治供电公司赵晓明担任副主编。三峡大学刘民编写第一章、邓长征编写第二章、唐波编写第三章、黄力编写第四章、孟遂民编写第五章、陈祥和编写第六章、李光辉编写第七章、高虹亮编写第八章、文中、长治供电公司赵晓明编写第九章及附录。另外，文中副教授对全书文字和内容作了全面校对和统稿，史振华高工、郭芳霞高工、张振平高工负责审阅。

本书编写过程中，得到了长治供电公司张永斌经理、李国宝书记及三峡大学电气与新能源学院向学军院长、袁兆强书记的大力支持，在此，一并表示感谢。

由于编者经验不足，业务水平有限，书中难免存在疏漏和不足之处，恳切希望广大同行和读者予以指正。

编 者

2012 年 6 月

目 录

前言

第一章 电工学基础	1
第一节 电路分析基础	1
第二节 正弦交流电路	6
第三节 三相交流电路	9
第四节 架空输电线路电学基础	12
第二章 电力系统基本知识	16
第一节 电力系统概述	16
第二节 输电方式	17
第三节 电力网的接线和规划	19
第四节 电力系统中性点的运行方式	21
第三章 高电压技术基础	26
第一节 气体放电原理	26
第二节 电晕放电原理及危害	39
第三节 绝缘子污秽放电	42
第四节 电力系统过电压概述	48
第四章 继电保护基本知识	60
第一节 继电保护概述	60
第二节 电网的电流保护	63
第三节 电网的距离保护	72
第四节 电网的纵联保护	74
第五节 自动重合闸	75
第五章 架空线路力学计算	80
第一节 设计用气象条件	80
第二节 导地线的机械物理特性、安全系数和比载	85
第三节 均布荷载下架空线的计算——斜抛物线法	89
第四节 气象条件变化时架空线的计算	94
第五节 连续档架空线应力的近似计算——代表档距法	99
第六节 架空线的风偏计算	101
第七节 悬垂串的摇摆角计算	105
第六章 杆塔受力分析计算	109
第一节 杆塔荷载的计算	109
第二节 钢筋混凝土电杆内力计算	123

第三节	环形截面钢筋混凝土构件的强度计算	140
第四节	铁塔受力计算	148
第五节	铁塔材料及其构件的计算	162
第六节	杆塔基础设计	166
第七节	下压基础的计算	183
第七章	输电线路检修施工与运行维护	189
第一节	输电线路施工概述	189
第二节	输电线路巡视与检测	199
第三节	输电线路停电检修	204
第四节	带电作业技术	216
第八章	输电线路常见故障及预防	233
第一节	概述	233
第二节	雷击故障及防雷措施	235
第三节	绝缘子的污闪故障及预防	244
第四节	振动故障及预防	248
第五节	输电线路风偏故障及预防	256
第六节	覆冰故障及预防	259
第七节	其他故障及预防	264
第九章	输电线路无损检测与在线监测技术	269
第一节	输电线路无损检测技术	269
第二节	输电线路在线监测技术	288
附录	110~500kV 架空输电线路缺陷判断	316
参考文献		323

电 工 学 基 础

第一节 电路分析基础

一、电路的物理量

电路的物理量主要包括以下几个。

1. 电动势

单位正电荷由低电位移向高电位时外场力所做的功，称为电动势。单位为 V（伏特，简称伏）。

2. 电压

单位正电荷由高电位移向低电位电场力所做的功，称为电压。单位为 V（伏特，简称伏）。

3. 电流

电流是电流强度的简称，是指电荷的有规则运动，单位时间内穿过导体截面积的电量，以 I 表示，单位为 A（安培，简称安）。

4. 电流密度

通过导线单位横截面的电流，称为电流密度，以 δ 表示。工程上常采用 A/mm^2 为单位，即

$$\delta = \frac{I}{S} \quad (1-1)$$

式中 S ——导线的截面积， mm^2 ；

I ——导线中的电流，A。

5. 功率

单位时间内电路吸收或者释放的电能，称为功率，以 P 表示，W。

6. 电阻与电阻率

表征电阻元件中的导体阻碍电荷移动的能力，称为电阻，以 r 表示， Ω （欧姆）。其大小与导体长度成正比，与导体截面积成反比，此外还与导体的材料有关，即

$$r = \rho \frac{l}{S} \quad (1-2)$$

式中 ρ ——导体的电阻率， $\Omega \cdot m$ ，又称为电阻系数，工程上通常用 $\Omega \cdot mm^2/m$ 作单位，其大小取决于导体的材料，不同的材料具有不同的电阻率，导体电阻率越大电阻也越大，导电性能越差；

l ——导体长度，m；

S ——导体截面积， m^2 ，在工程上导线截面积单位常用 mm^2 。

7. 电导与电导率

衡量导体传导电流的能力，称为电导，是电阻的倒数，以 g 表示，单位为 S（西门子）。

$$g = \frac{1}{r} \quad (1-3)$$

电导率是衡量物质导电性能的参数，是电阻率的倒数，以 γ 表示，单位为 $1/\Omega \cdot m$ ，但

工程上导线的电导率单位常用 $\text{m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$ ，即

$$\gamma = \frac{1}{\rho} (\text{m}/\Omega \cdot \text{mm}^2) \quad (1-4)$$

8. 电容与电容率

电容是宏观地表征两导体和其间电介质特性的参量，可表示为

$$C = \frac{q}{U} \quad (1-5)$$

式中 q ——两导体分别带有的等量正负电荷，C；

U ——两导体间的电压，V。

电容的单位是 C/V（库伦/伏），即 F（法拉，简称法），实际应用中，F 的单位太大，常用 μF （微法）、 pF （皮法）作单位。 $1\text{F}=1 \times 10^6 \mu\text{F}$ ， $1\mu\text{F}=1 \times 10^6 \text{pF}$ 。

电容率表征电介质极化性质的宏观物理量，也称为介电常数，其定义为电位移 D 和电场强度 E 之比，即

$$\epsilon = \frac{D}{E} \quad (1-6)$$

式中 D ——电位移；

E ——电场强度。

电介质的电容率 ϵ 与真空电容率 ϵ_0 之比称为该电介质的相对电容率 ϵ_r ， $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ 是无量纲的纯数。

在电介质中，任何结构的导体都存在电容，在工程上为了获得某一定值的电容，常设计各种形状的导体组合，再填充适当的电介质。这种器件称为电容器。两个导体叫做极板，在电容器上标注的是电容值及其运行电压。

在电力系统分析中，要会计算输电线路导线之间电容。如两相导线之间的电容、三相导线之间每相导线电容、单根导线对地电容、分裂导线对地电容，等等。

9. 自感与互感

电路中因自身电流变化而感应电动势的现象称为自感。自感总是正值，一个载流线圈的自感定义为

$$L = \frac{n\Phi}{i} = \frac{\Psi}{i} (\text{H}) \quad (1-7)$$

式中 n ——线圈匝数；

Φ ——与线圈交链的磁通，Wb；

Ψ ——线圈的磁链，Wb；

i ——线圈中的电流，A。

因一电路中的电流变化在邻近另一个电路中出现感应电动势的现象叫做互感。可表示为

$$M_{21} = \frac{\Psi_{21}}{i_1} (\text{H}) \quad (1-8)$$

式中 M_{21} ——线圈 1 对线圈 2 的互感；

Ψ_{21} ——线圈 1 中电流 i_1 产生的磁通与线圈 2 交链的磁通。

同样线圈 2 对线圈 1 的互感是

$$M_{12} = \frac{\Psi_{12}}{i_2} (\text{H}) \quad (1-9)$$

可以证明 $M_{12}=M_{21}$ 。

自感与导磁物质的磁导率 μ 以及线圈周围导磁物质中的磁场分布情况有关, 也与线圈形状、大小、匝数有关。对于互感, 还与两线圈相互位置有关。几种典型结构的电感有圆截面直导线段的自感、同轴电缆的电感、平行直导线间的互感、两对输电线之间的互感、两线制输电线的电感、三线制输电线的电感、圆环的电感、长螺管线圈自感、短螺管线圈的自感, 等。这些电感的计算公式可参阅《供用电实用手册》。

二、电路元件

1. 电阻元件

电阻元件在电路中主要是消耗能量的。如电阻器、电灯、架空输电导线。在电路中主要表现为将电能转化为热能, 即在电路中主要表现的特性为电阻性, 则这些器件称为电阻元件。若该元件两端任意瞬间电压与其流经瞬间电流比值 $R=\frac{u}{i}$ 为一常数, 则该元件称为线性电阻元件, 若比值不为常数则为非线性电阻元件。氧化锌避雷器就是一个典型的非线性元件, 氧化锌避雷器在其两端加载低电压时表现出高电阻甚至是绝缘, 但是加载的电压达到某个值时, 其电阻将急剧减小, 表现为低电阻, 为雷电流提供泄流通道, 从而达到避雷的作用。

2. 电感元件

电感元件是用导线绕制的线圈 (有空心线圈和铁芯线圈), 电感基本不消耗电能, 电感主要是将电源的能量存储起来或者返还给电源。

在分析电路时, 如图 1-1 所示, 对于一个两端电感元件, 电感两端电压为 u , 流经的电流为 i , 它的磁通链 ψ 与流经的电流 i 的关系曲线中, 若 $\frac{\psi}{i}=L=\text{常数}$, 则称该电感为线性电感元件, 否则为非线性电感元件。

对于线性电感, 当电感中的磁通 ϕ 或电流 i 发生变化时, 则电感中产生感应电动势 e_L , 当电感中电压电流方向如图 1-1 中所示时, 有

$$e_L = -N \frac{d\phi}{dt} = -\frac{d\psi}{dt} = -L \frac{di}{dt} \quad (1-10)$$

图 1-1 电感元件

$$u = -e_L = L \frac{di}{dt} \quad (1-11)$$

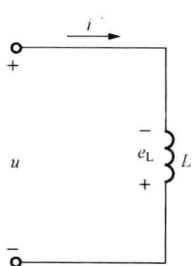
由式 (1-11) 可知, 电感的端电压与电流的变化率成正比。当流过电感的电流为恒定直流时, 端电压 $u=0$, 即相当于电感被视为短路。

3. 电容元件

电容器两端加上电压后, 如图 1-2 所示, 两极板上存储电荷, 在介质中建立电场。电路中电容元件两端存储的电荷为 q , 若 $\frac{q}{u}=C$ 为常数, 则该电容称为线性电容, 否则称为非线性电容。本书除特别说明外, 电容均指线性电容。

当电容的电压和电流采用如图 1-2 所示的关联方向时, 两者关系为

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-12)$$



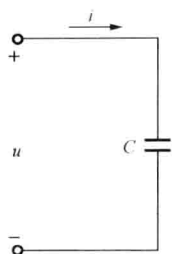


图 1-2 电容元件

由式 (1-12) 可知, 电容的电流与其两端电压的变化率成正比。当电容两端加恒定的直流电压时, 其电流为 0, 故在直流电路中, 电容可视为开路。

4. 电源元件

电源有一次电源和二次电源。一次电源是把其他能源换成电能, 如水力、火力、风力及核能发电等, 即俗称电网或者市电。二次电源是对已有的电源进行控制, 如对交流经过整流器变成直流。其输出表现为直流、交流、脉冲等形式。输出为直流的称为直流电源, 输出为交流的称为交流电源。

在电力系统中, 电源多为交流电源。在直流电源中, 主要有电压源和电流源之分。

(1) 电压源。任何一个实际的电源都含有电动势 E 和内阻 R_0 , 在建立电源模型时一般将其用一个理想的电压源 E 和内阻 R_0 串联在一起表示, 如图 1-3 (a) 所示。

理想电压源 E , 其电源两端提供的电压是定值, 不随时间不随外电路负载变化而变化。电源与外接的负载接通后, 流过的电流由负载电阻大小决定。实际电压源, 其端电压随电流增大而减小, 变化规律如图 1-3 (b) 所示, 原因是内阻产生压降。当 $R_0=0$, 电压 U 恒定等于电动势 E , 其中电流则由负载 R_L 及电压 U 确定, 当内阻 R_0 远小于 R_L 时, 内阻压降很小, 实际电源就可以用理想电压源来等效。

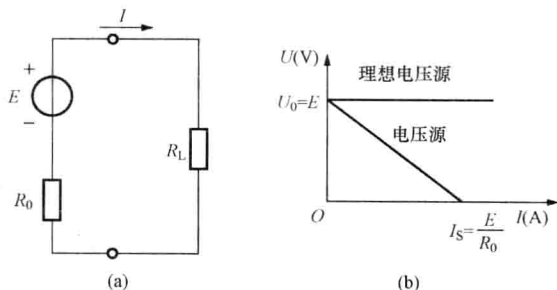


图 1-3 电压源

(2) 电流源。一个实际的电源在建立模型时, 可以用一个理想的电流源 I_s 和内阻 R_0 并联在一起来表示, 如图 1-4 (a) 所示。

理想电流源 I_s , 其电源两端提供的电流是定值, 不随时间不随外电路负载变化而变化。电源与外接负载接通后, 电源两端的电压由负载电阻大小决定。实际电流源, 其端电流随电压增大而减小, 变化规律如图 1-4 (b) 所示, 原因是内阻上有电流降。当 $R_0=\infty$ 时, 电流 I 恒定等于电流源 I_s 。实际电源就可以用理想电流源来等效。

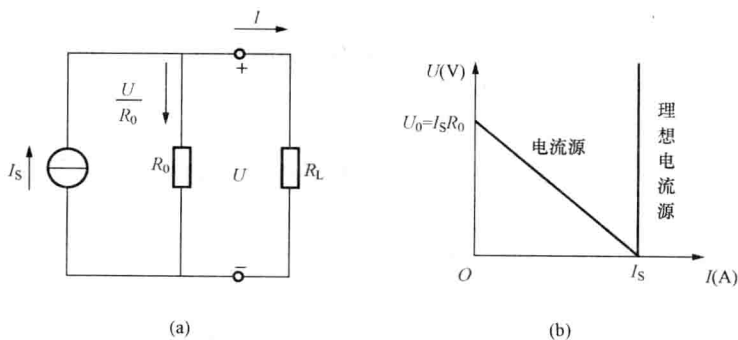


图 1-4 电流源

三、电路基本定律

1. 欧姆定律

当导体温度不变时，通过一段无源支路的电流与支路两端的电压成正比，这便是欧姆定律，即

$$i = \frac{u}{R} \quad (1-13)$$

式中 i ——支路电流，A；

u ——支路两端电压，V；

R ——支路电阻， Ω 。

2. 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流（KCL）定律可表述为：在集中参数电路中，任何时刻，对任意节点（闭合面），所有流入流出该节点（闭合面）的支路电流的代数和恒等于零，即 $\sum i = 0$ 。如图 1-5 中的节点 a 和闭合面 ABC 均有 $I_A + I_B + I_C = 0$ 。

3. 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压（KVL）定律可表述为：对于任意一个集中参数电路中的任意一个回路，在任何时刻，沿该回路的所有支路电压代数和等于零，即对任一闭合回路 $\sum U = 0$ 。若这一回路是由电源和电阻构成的，则 $\sum E = \sum (RI)$ 。如图 1-6 (a) 中左回路和右回路分别有 $E_1 + I_1 R_1 + I_3 R_3 = 0$ 和 $E_2 + I_2 R_2 + I_3 R_3 = 0$ 。

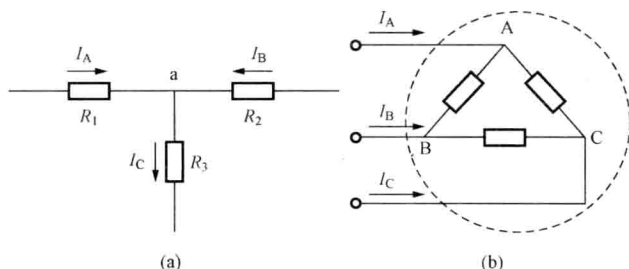


图 1-5 电路中普通节点与闭合面

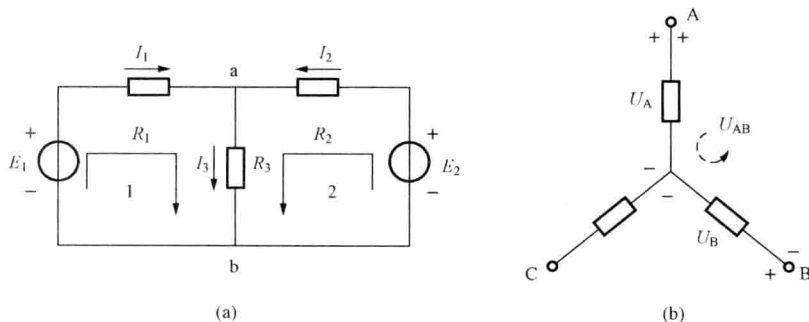


图 1-6 电路中回路与闭合回路

基尔霍夫电压定律不仅适用于闭合回路，也可推广应用于回路的部分电路。如图 1-6 (b) 中各支路元件，根据基尔霍夫电压定律有 $\sum U = U_A - U_B - U_{AB} = 0$ ， $U_{AB} = U_A - U_B$ 。

四、电路基本定理

1. 叠加定理

在线性电路中，任一支路的电流（或电压）可以看成是电路中每一个独立电源单独作用于电路时，在该支路产生的电流（或电压）的代数和。如图 1-7 所示， R_2 上电流为电压源和电流源分别作用在上面电流的和，即

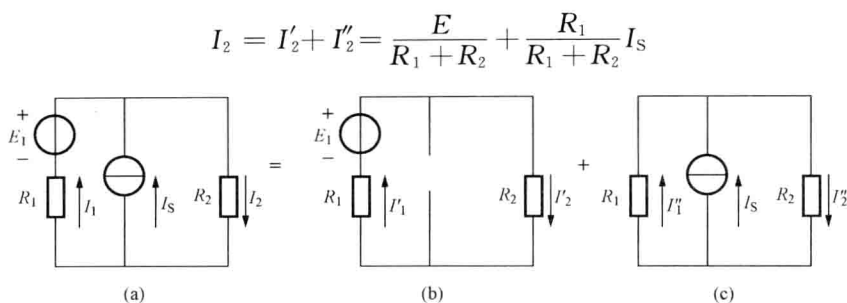


图 1-7 电路图

2. 戴维宁定理

任何一个线性含源的二端网络 N ，如图 1-8 (a) 所示，就其 a 、 b 两端而言，总可以用一个理想的电压源 U_S 和一个内阻 R_0 串联的电路来等效代替，如图 1-8 (b) 所示，其中 U_S 等于该二端网络的开路电压 U_0 ，如图 1-8 (c) 所示，内阻 R_0 等于该有源二端网络中所有的电源皆为零值时所得的等效电阻 R_{ab} ，如图 1-8 (d) 所示，电源为零值即是电压源短路，电流源开路。这就是戴维宁定理。

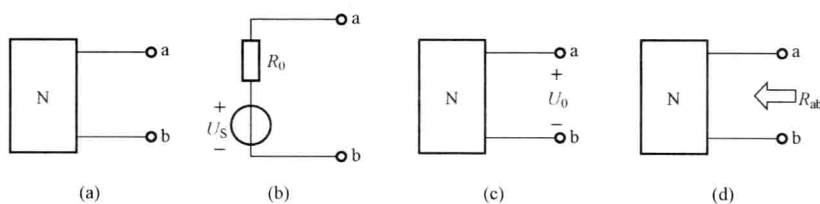


图 1-8 戴维宁定理

(a) 有源二端网络；(b) 等效电路；(c) 开路电压；(d) 等效电阻

3. 诺顿定理

任何一个线性有源二端网络 N ，如图 1-9 (a) 所示，就其 a 、 b 端口而言，都可以用一个恒流源 I_S 和一个内阻 R_0 并联的电路来等效代替。其中 I_S 等于该二端网络的短路电流，如图 1-9 (c) 所示，等效内阻 R_0 等于该二端网络中所有电源皆为零值时的等效电阻 R_{ab} ，如图 1-9 (d) 所示，电源为零值即是电压源短路，电流源开路，这就是诺顿定理。

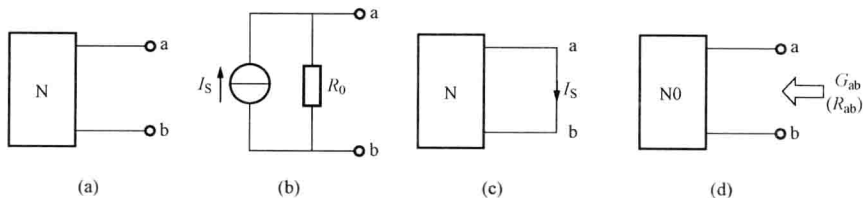


图 1-9 诺顿定理

(a) 有源二端网络；(b) 等效电路；(c) 短路电流；(d) 等效电阻

第二节 正弦交流电路

电动势、电压、电流的大小和方向随时间作周期性变化的电路称为交流电路。电动势、

电压和电流的大小和方向随时间作正弦规律变化的电路则称为正弦交流电路，它是交流电路的基本形式。

一、正弦交流电路

大小和方向随时间按照正弦规律变化的电流称为正弦交流电流，其波形图如图 1-10 所示，电流瞬时值 i 的表达式为

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1-14)$$

式中三个关键的要素分别是电流的最大值 I_m ，单位为 A；电流的角频率 ω ，单位为 rad/s；时间 $t=0$ 时的相位，也称为初相位 φ ，单位为 rad。只要确定正弦量的三要素，就能确定该正弦量值。

如图 1-10 所示，交流电瞬时值是不断变化的，变化一周所需要的时间即是周期 T ，单位为 s（秒）。每秒钟变化的次数称为频率 f ，单位为 Hz（赫兹），周期和频率互为倒数。电力供电的频率称为工频，我国标准是 50Hz，美日等国家用 60Hz，航空工程上用的是 400Hz，林业用 200Hz。

正弦交流电流瞬时值的表达式中的电角度 $\omega t + \varphi$ 称为正弦交流电流的相位角或相位。当 $t=0$ 时的相位称为初相位，简称初相。两个同频率的正弦量的初相之差称为它们的相角差或者相位差。相位差为零的两个正弦量称为同相。

正弦变化的快慢还可以用角频率 ω 来表示，表示相角在每秒钟变化的弧度数，即

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{1}{T} \quad (1-15)$$

二、交流电的有效值

有效值也称均方根值。交流电流 i 的有效值是指在相同电阻中分别通以直流电流与交流电流，如经过一个交流周期时间，它们在电阻上消耗的能量是相等的，则把该直流电流的大小作为交流电流的有效值，以 I 表示，计算公式是

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$$

正弦交流电 $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ 的有效值为

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2(\omega t + \varphi) dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 I_m \quad (1-16)$$

同理，交流电动势与交流电压的有效值 E 和 U 分别为 $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0.707 U_m$ 和 $E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0.707 E_m$ 。在电力系统中，若无特别说明，凡是讲交流电动势、电压与电流都是指有效值，电气设备和元件所称的额定电压和额定电流，以及交流仪表上电压和电流的刻度一般也是指有效值。

三、正弦量的表示方法

一个正弦交流量的表示方法主要有三角函数法、波形法、旋转矢量法和相量法。三角函数法和波形法表示比较直观，但不便于计算。旋转矢量法仍然复杂，下面主要介绍相量法。

相量法是利用复数量来代替正弦量，用以进行稳态电路性能运算的方法。由于一个稳态

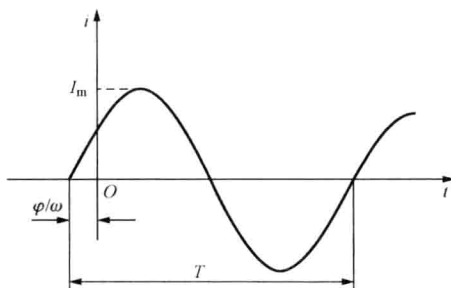


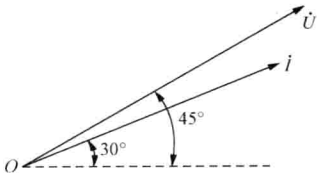
图 1-10 正弦交流电流

正弦交流电路中正弦量均是同频率，因此忽略分析 ω ，只要确定有效值（或幅值）与初相位即可。正弦量与复数量间变化方法如下。

电流 $i = \sqrt{2}I\sin(\omega t + \varphi) \Rightarrow \dot{I} = I\angle\varphi$

电压 $u = \sqrt{2}U\sin(\omega t + \phi + \varphi) \Rightarrow \dot{U} = U\angle(\phi + \varphi)$

[例 1-1] 如图 1-11 所示电流 i 与电压 u 的相量图表示的分别是工频电流和工频电压，若电流相量段长为 5，电压相量段长为 50，写出其电流、电压的三角函数表达式和相量表达式。



解：由图 1-11 可知交流电流与交流电压的三角函数表达式与相量表达式分别为

$$i = 5\sqrt{2}\sin(314t + 30^\circ) \Rightarrow \dot{I} = 5\angle 30^\circ$$

$$u = 50\sqrt{2}\sin(314t + 45^\circ) \Rightarrow \dot{U} = 50\angle 45^\circ$$

图 1-11 电流与电压的相量图 注意：只有同频率的正弦量才能在同一相量图上表示。

四、电阻、电感、电容元件单相交流电路特性

电阻、电容、电感是交流电路的三个基本参数。电阻是消耗电能的，电感与电容是存储或交换电能的。这些单一参数的正弦交流电路中各量的关系见表 1-1。设元件电压 $u = U_m \sin \omega t = \sqrt{2}U \sin \omega$ 为参考方向，电压 u 的相量表达式为 $\dot{U} = U\angle 0$ 。

表 1-1 不同参数电路中各量的关系

参数	电阻 R	电感 L	电容 C	电阻电感电容串联 Z
电路图				
性能方程	$u = Ri, i = \frac{u}{R}, \dot{U} = R\dot{I}$	$u = L \frac{di}{dt}, i = \frac{1}{L} \int u dt, \dot{U} = j\omega L \dot{I} = jX_L \dot{I}$	$u = \frac{1}{C} \int i dt, i = C \frac{du}{dt}, \dot{U} = -j \frac{1}{\omega C} \dot{I} = -jX_C \dot{I}$	$u = Zi, i = \frac{u}{Z}, \dot{U} = Z \dot{I}$
副参数	电阻 R	感抗 $X_L = \omega L = 2\pi fL$ 感纳 $B_L = \frac{1}{X_L}$	容抗 $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$ 容纳 $B_C = \frac{1}{X_C}$	复阻抗 $Z = R + j\omega L - j \frac{1}{\omega C}$, 阻抗模 $ z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ 阻抗角 $\varphi = \arctan \frac{X_L - X_C}{R}$ 电抗 $X = X_L - X_C$
相量图				
瞬时功率	$p = ui$	$p = ui$	$p = ui$	$p = ui$
平均功率 (W)	$P = UI$	$P = 0$	$P = 0$	$P = UI \cos \varphi$
无功功率 (var)	$Q = 0$	$Q = UI$	$Q = UI$	$Q = UI \sin \varphi$

由表 1-1 可知：①电阻元件电压电流同频率同相位，有功功率即平均功率始终大于 0，始终为负载，消耗能量，没有无功功率，即不存在与电源交换电能的现象。电感元件电流相位滞后电压相位 90° ，有功功率为 0，即不消耗能量，但是有无功功率，即与电源存在交互电能的现象。电容元件电流超前电压相位 90° ，有功功率为 0，也不消耗能量，但是有无功功率，即与电源存在交互电能的现象。②电阻电感电容串联电路中，若阻抗角（也称功率因数角） $\varphi=0$ 电路呈阻性， $\varphi>0$ 电路呈感性， $\varphi<0$ 电路呈容性。电力系统中，功率因数 $\cos\varphi$ 越大，表示电路和电源之间传递的无功能量越少，因此，电力工程中希望 $\cos\varphi$ 越小越好。

第三节 三相交流电路

一、三相交流电

由频率相同、最大值相等而相位互差 120° 的三个单相正弦交流电动势构成的电路称为三相对称正弦交流电路。三相交流电动势是由三相交流发电机产生的。发电机定子的三个绕组 A（首端）X（末端）、B（首端）Y（末端）、C（首端）Z（末端），分别称为 A 相、B 相和 C 相绕组。假定 A 相绕组上的电动势由负到达零点作为计算时间的起点，即把 A 相电动势定为参考量，则三相对称电动势的瞬时值可写为

$$\begin{cases} e_A = E_m \sin\omega t \\ e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ e_C = E_m \sin(\omega t + 120^\circ) \end{cases} \quad (1-17)$$

相量表示为

$$\begin{cases} \dot{E}_A = E_m \angle 0^\circ \\ \dot{E}_B = E_m \angle -120^\circ \\ \dot{E}_C = E_m \angle 120^\circ \end{cases} \quad (1-18)$$

对称三相交流电动势波形图与相量图表示如图 1-12 所示。

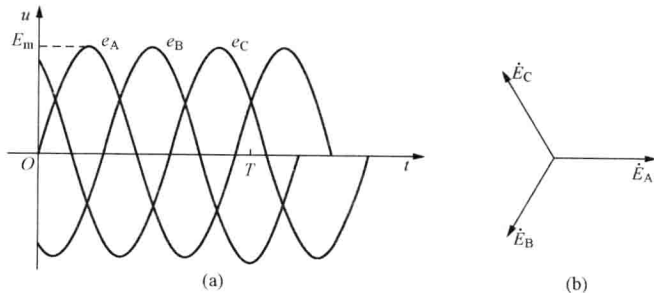


图 1-12 对称三相交流电动势

(a) 三相正弦电压波形；(b) 相量图

二、三相交流电星形连接和三角形连接

1. 星形 (Y) 连接

电源的星形连接是把发电机三个绕组的末端 X、Y、Z 连接在一起，这一点叫做中性点，而把三个首端 A、B、C 作为连接外电路用。如图 1-13 所示，如果负载也是星形连接，它的中性点是 O' ，则连接两个中性点 OO' 的导线称为中性线（俗称零线）。连接发电机和负载

之间的导线 AA' 、 BB' 、 CC' 称为相线, 如图 1-13 所示, 这种连接方法称为三相四线制, 若无中性线 OO' 则电路是三相三线制。

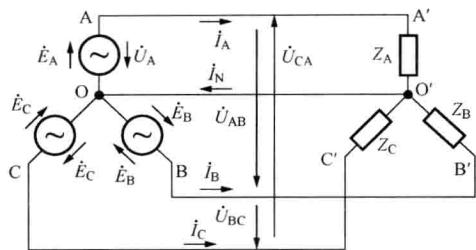


图 1-13 星形电源—星形负载电路

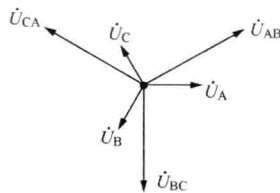
在三相电路中, 发电机的三相绕组的电动势称为相电动势, 从各线首端到其中性点的电压叫做相电压, 如图 1-13 中 AO 、 BO 、 CO 之间的电压。发电机绕组中的电流和负载各相中的电流称为相电流, 两个相线之间的电压称为线电压, 如图 1-13 中 AB 两端电压、 BC 两端电压、 CA 两端电压, 各相线中的电流称为线电流。

不论是电源还是负载, 在星形连接时, 相电流、线电流、相电压、线电压有如下关系。

(1) 相电流就是线电流。

(2) 两相间的线电压等于两个相邻相电压的相量差。即

$$\begin{cases} \dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B \\ \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C \\ \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A \end{cases}$$



相量图如图 1-14 所示, 各线电压相位超前各相电压相位。

图 1-14 三相交流相电压、线电压相量图

(3) 电路中如有中性线存在, 则中性线电流等于三个线电流

之和, 即 $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$, 若电路无中性线, 则 $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$ 。

(4) 不论电路中有无中性线, 三个线电压之和均为零, 即

$$\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0$$

2. 三角形 (Δ) 连接

如图 1-15 所示, 电源的三角形连接是将发电机的三个绕组的末端和滞后的一个相绕组的始端依次相连, 接成一个三角形, 并从三个连接端引出三根线接至负载。

在三角形三相电路中, 不论电源或负载, 电压电流都有下列基本关系。

(1) 线电压就是相电压。

(2) 线电流等于两个相邻相电流的相量差, 如图 1-16 所示, 有

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \dot{I}_{A'B'} - \dot{I}_{C'A'} = \dot{I}_{BA} - \dot{I}_{AC} \\ \dot{I}_B = \dot{I}_{B'C'} - \dot{I}_{A'B'} = \dot{I}_{CB} - \dot{I}_{BA} \\ \dot{I}_C = \dot{I}_{C'A'} - \dot{I}_{B'C'} = \dot{I}_{AC} - \dot{I}_{CB} \end{cases}$$

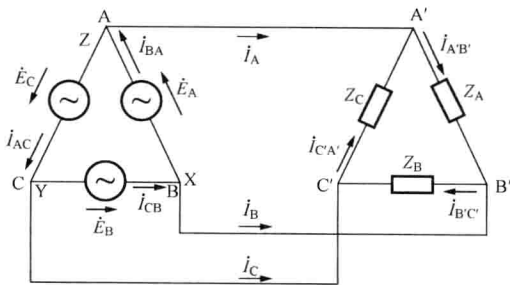


图 1-15 三角形连接电源—三角形连接负载电路

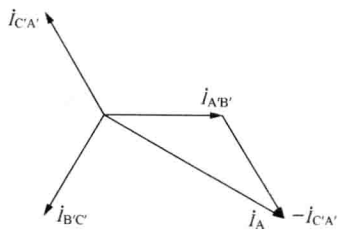


图 1-16 相电流与线电流的相量图

(3) 三个线电流之和为零, 即

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$$

(4) 三个线电压之和为零, 即

$$\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0$$

三、三相交流电路的计算

三相电动势对称, 各相内阻抗也对称的三相电源称为对称三相电源。若三相负载阻抗完全相同, 则称为三相对称负载。由对称的三相电源和对称的三相负载以及阻抗完全相同的三相相线导线组成的三相电路称为对称的三相电路。

1. 星形对称电路计算

如图 1-13 所示, 在星形电路中, 由于三相完全对称, 所以中性线上电流 $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$ 。中性线上电压 $\dot{U}_{00} = 0$, 故此电路中中性线有无对电路无任何影响, 且此电路只需计算一相即可。

以 A 相为例, 计算电路中 A 相中的相电流

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z_A}$$

电路中线电压和相电压的关系是

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B = \sqrt{3}\dot{U}_A \angle 30^\circ$$

即在此电路中, 不论电源端还是负载端, 线电流等于相电流 $I_l = I_p$ (式中, I_p 为相电流, I_l 为线电流), 线电压幅值等于 $\sqrt{3}$ 倍的相电压幅值, 线电压相位超前相电压相位 30° 。即 $U_p = \sqrt{3}U_l$ (式中, U_p 为相电压, U_l 为线电压)。

2. 三角形对称电路计算

在如图 1-15 的三角形连接电路里, 线电压即是相电压, 即 $U_l = U_p$ 。同理, 三相对称电路, 计算一相即可。由图 1-15 可分析, 在负载中相电流、线电流有 $\dot{I}_{A'B'} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z}$, $\dot{I}_A = \dot{I}_{A'B'} - \dot{I}_{C'A'} = \sqrt{3}\dot{I}_{A'B'} \angle 30^\circ$ 。则由此可以得出线电流幅值是相电流幅值的 $\sqrt{3}$ 倍, 即 $I_l = \sqrt{3}I_p$, 线电流相位超前相电流相位 30° 。

3. 星形不对称电路计算

在不对称的星形—星形电路中, 三相电源 E_A 、 E_B 、 E_C 或三相的负载 Z_A 、 Z_B 、 Z_C 不对称。在不对称三相电路中的负载电压电流要分别计算。如: $\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z_A}$, $\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{Z_B}$, $\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{Z_C}$, $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \dot{I}_N$, 若三相连接导线的阻抗视为零, 则 $\dot{E}_A = \dot{U}_A$ 、 $\dot{E}_B = \dot{U}_B$ 、 $\dot{E}_C = \dot{U}_C$ 。

4. 三角形不对称电路计算

在不对称的三角形—三角形电路中, 三相电源 E_A 、 E_B 、 E_C 或三相的负载 Z_A 、 Z_B 、 Z_C 不对称。在不对称三相电路中的负载电压电流要分别计算。如

$$\dot{I}_{A'B'} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{AB}}, \dot{I}_{B'C'} = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_{BC}}, \dot{I}_{C'A'} = \frac{\dot{U}_{CA}}{Z_{CA}}, \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \dot{I}_N$$

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A'B'} - \dot{I}_{C'A'}, \dot{I}_B = \dot{I}_{B'C'} - \dot{I}_{A'B'}, \dot{I}_C = \dot{I}_{C'A'} - \dot{I}_{B'C'}$$