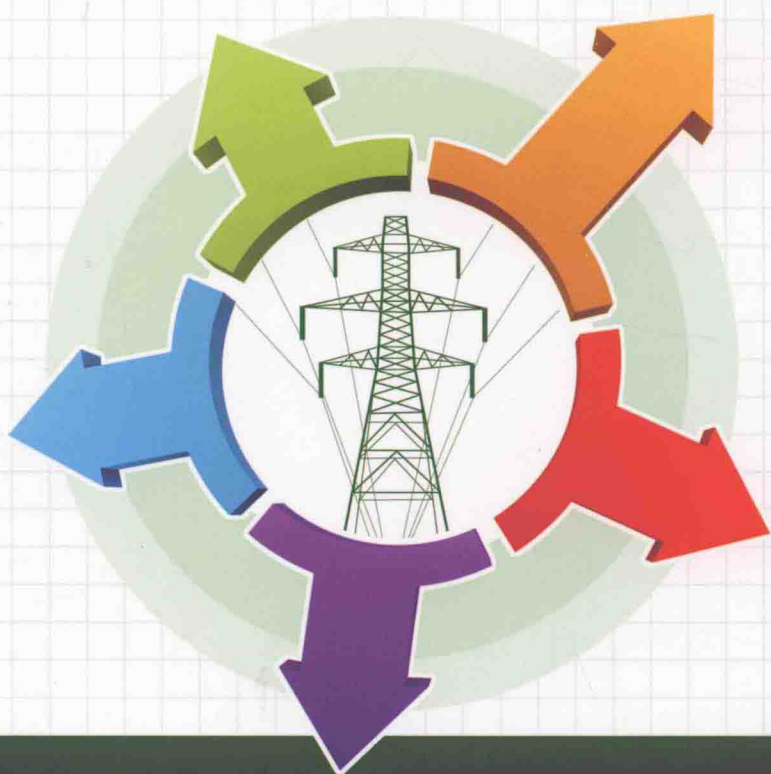


面向智能电网的 电能计量理论与技术

袁瑞铭 王学伟 易忠林 丁恒春
姜振宇 李先怀 任智仁 编 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

面向智能电网的 电能计量理论与技术

袁瑞铭 王学伟 易忠林 丁恒春
姜振宇 李先怀 任智仁 编 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

电能计量作为智能电网的重要组成部分,已广泛应用于发电、输电、配电和用电各环节,准确合理的电能计量将保证电能供需双方的经济利益,对电能的公平交易和电力市场的规范化发展有着非常重要的实际意义。为了让广大的电气测量、电能计量等专业人员快速全面了解电能计量基础理论与关键技术,有效提升知识结构和能力水平,国网冀北电力有限公司电力科学研究院计量中心组织编写了《面向智能电网的电能计量理论与技术》。

本书分为7章,主要介绍了电能计量的基础知识与方法,感应式、电子式电能表的基本原理,特种电能表的功能、技术及其应用,采样测量技术及算法,采样测量技术在电能表计量芯片中的实际应用,谐波及畸变条件下有功和无功电能计量的若干问题等内容。

本书可作为营销用电、电气测量、电能计量等专业技术人员和管理人员的学习培训教材及工作参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

面向智能电网的电能计量理论与技术/袁瑞铭等编著. —北京:中国电力出版社,2018.10
ISBN 978-7-5198-1598-1

I. ①面… II. ①袁… III. ①电能计量—研究 IV. ①TM933.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第013794号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:刘丽平(010-63412342)

责任校对:朱丽芳

装帧设计:左 铭 张俊霞

责任印制:石 雷

印 刷:北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次:2018年10月第一版

印 次:2018年10月北京第一次印刷

开 本:787毫米×1092毫米 16开本

印 张:9

字 数:173千字

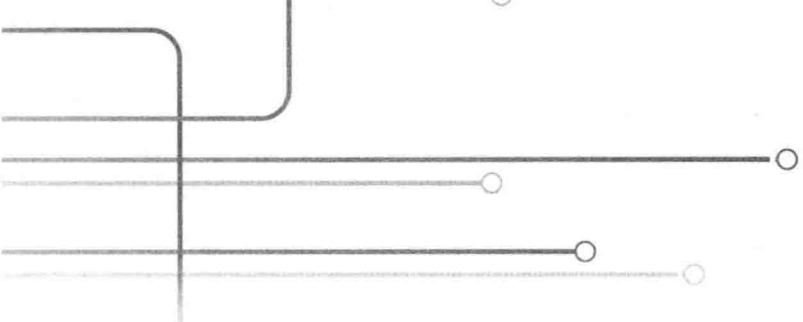
印 数:0001—1000册

定 价:36.00元



版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换



前 言

电能计量作为智能电网的重要组成部分,已广泛应用于发电、输电、配电和用电各个环节,准确合理的电能计量将保证电能供需双方的经济利益,对电能的公平交易和电力市场的规范化发展有着非常重要的实际意义。

电能表作为国家法定计量器具和测量电能的专用仪表,是计量收费与电网技术管理现代化的基础设备,电能表的误差性能和测试技术水平将直接影响电能计量管理的质量,因此要求其必须具备高精度、长寿命、低功耗等特点。为了适应用户不断变化的需要和便于用电的管理,还要求电能表具有高过载、多功能、智能化、防窃电等功能。

本书探讨了面向智能电网的电能计量理论与技术,主要包括电能计量基础知识与方法、电能表基本原理、特种电能表、采样测量技术及应用、畸变波形条件下的电能计量等。第1章主要介绍了电能计量的基础知识;第2章对电能计量方法,即三相有功和无功电能的计量方法进行了概述;第3章介绍了感应式、电子式电能表的基本原理;第4章叙述了主要特种电能表的功能、技术及其应用;第5章详细介绍了采样测量技术及算法;第6章阐述了采样测量技术在电能表计量芯片中的实际应用;第7章初步探讨了在谐波及畸变条件下有功和无功电能计量的若干问题。

因时间和水平所限,错误和不全面之处在所难免,故请指正。

目 录

前言

1	电能计量的基础知识	1
1.1	瞬时功率、瞬时有功功率、瞬时无功功率	1
1.2	平均功率、无功功率、视在功率、功率因数和复功率	4
2	电能计量方法	7
2.1	有功电能的计量	7
2.2	无功电能的计量	11
3	电能表原理	15
3.1	电能表的分类	15
3.2	单相多功能电能表	15
3.3	三相多功能电能表	18
3.4	有功电能表	19
3.5	感应式电能表	20
3.6	电子式电能表	23
4	电能表	36
4.1	多功能电能表	36
4.2	智能电能表	37
4.3	特种电能表	40
5	采样测量技术及算法	54
5.1	离散时间信号与系统的基础知识	54
5.2	均匀采样测量技术及算法	58
5.3	准同步采样测量技术及算法	71

6 采样测量技术在电能表中的应用 90

6.1 新型单相计量芯片 RN8209 90

6.2 单相多功能电能计量芯片 BL6523GX 98

6.3 三相计量芯片 RN8302 103

6.4 新型三相计量芯片 IDT90E36 117

7 畸变波形条件下的电能计量 126

7.1 畸变波形产生的机理 126

7.2 谐波条件下的有功电能 128

7.3 谐波电能所占分量的估计 129

7.4 当前非线性负载电能用户电能计量中存在问题的分析 130

7.5 畸变波形条件下无功电能的计量 132

电能计量的基础知识

1.1 瞬时功率、瞬时有功功率、瞬时无功功率

1.1.1 瞬时功率

设电源 $u(t)$ 给负载 Z 供电, 则有电流 $i(t)$ 流过负载, 并对负载做功, 如图 1-1 所示。在某一瞬时 t , 电源输送给负载的功率定义为瞬时功率 $p(t)$, 表示为:

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1-1)$$

式中 $p(t)$ ——瞬时功率, W;

$u(t)$ ——瞬时电压, V;

$i(t)$ ——瞬时电流, A。

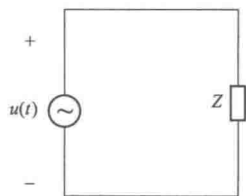


图 1-1 简单功率电路

对正弦交流电路, 设电压 $u(t) = U_m \sin \omega t$, 且电流 $i(t) = I_m \sin(\omega t - \varphi)$, 则瞬时功率可进一步表示为:

$$\begin{aligned} p(t) &= U_m I_m \sin(\omega t) \cdot \sin(\omega t - \varphi) \\ &= UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi) \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中 $p(t)$ ——该符号意义同式 (1-1);

U_m ——电压幅值, V;

I_m ——电流幅值, A;

U ——电压有效值, V;

I ——电流有效值, A;

φ ——电流初始相位, rad;

ω ——角频率, rad/s。

式 (1-2) 中, 瞬时电压、瞬时电流和瞬时功率的波形如图 1-2 所示。

关于瞬时功率, 需注意以下几个概念:

(1) 瞬时功率可正可负, $p(t) > 0$ 时, 表示电源向负载输出功率, 即负载吸收能量。

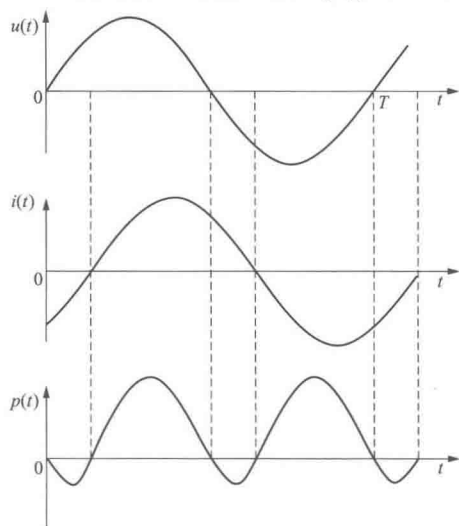


图 1-2 瞬时功率波形图

当 $p(t) < 0$ 时, 表示负载向电源回馈能量, 这是由于负载当中有储能元件 (L 或 C) 和电源之间产生了能量的交换。

(2) 在电能测量中, 计算瞬时功率 $p(t)$ 的需要四象限乘法器, $p(t)$ 的变化象限如图 1-3 所示。

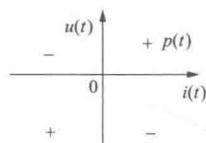


图 1-3 四象限乘法器功率变化象限

(3) 式 (1-2) 中的第一项 $UI \cos \varphi$ 是恒定分量, 表示负载一个周期消耗的平均功率; 第二项 $UI \cos(2\omega t - \varphi)$ 是功率二次谐波分量, 在一个周期内的均值为零, 因此它不做功。

1.1.2 瞬时有功功率

在正弦交流电路中, 我们可以把负载电流 $i(t)$ 做如下正交分解:

$$\begin{aligned} i(t) &= I_m \sin(\omega t - \varphi) \\ &= I_m \cos \varphi \cdot \sin \omega t - I_m \sin \varphi \cdot \cos \omega t \end{aligned} \quad (1-3)$$

式中 $i(t)$ ——该符号意义同式 (1-1);

I_m 、 φ 、 ω ——该符号意义同式 (1-2)。

则定义负载电流 $i(t)$ 分解的第一项为瞬时有功电流: $i_p(t) = I_m \cos \varphi \cdot \sin \omega t$, 定义负载电流 $i(t)$ 分解的第二项为瞬时无功电流: $i_q(t) = -I_m \sin \varphi \cdot \cos \omega t$, 负载瞬时电流 $i(t)$ 与有功和无功电流的关系可表示为: $i(t) = i_p(t) + i_q(t)$ 。

瞬时有功功率为 $p_p(t) = u(t) \cdot i_p(t)$

$$\begin{aligned} &= U_m \sin \omega t \cdot I_m \cdot \cos \varphi \cdot \sin \omega t \\ &= U_m I_m \cos \varphi \cdot \sin^2 \omega t \\ &= \frac{1}{2} U_m I_m \cdot \cos \varphi - \frac{1}{2} U_m I_m \cos \varphi \cdot \cos 2\omega t \\ &= UI \cos \varphi - UI \cos \varphi \cdot \cos 2\omega t \end{aligned} \quad (1-4)$$

式中

$i_p(t)$ ——瞬时有功电流, A;

$p_p(t)$ ——瞬时有功功率, W。

瞬时有功功率的波形图见图 1-4。

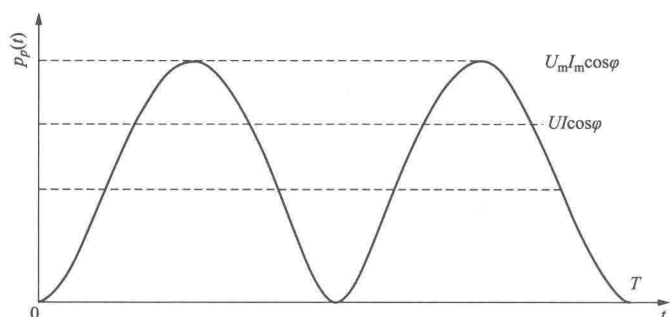


图 1-4 瞬时有功功率波形图

由式 (1-4) 和图 1-4 可知 $p_p(t) \geq 0$, 并且它在一个周期内的均值为 $UI \cos \varphi$ 与瞬时功率 $p(t)$ 在一个周期内的均值是一致的。

1.1.3 瞬时无功功率

$$\begin{aligned}
 p_q(t) &= u(t)i_q(t) \\
 &= -U_m \sin(\omega t) \cdot I_m \cdot \sin \varphi \cdot \cos(\omega t) \\
 &= -\frac{U_m I_m}{2} \cdot \sin \varphi \cdot \sin(2\omega t) \\
 &= -UI \cdot \sin \varphi \cdot \sin(2\omega t)
 \end{aligned} \tag{1-5}$$

式中 $i_q(t)$ ——瞬时无功电流, A;

$p_q(t)$ ——瞬时无功功率, var。

瞬时无功功率的波形见图 1-5。

显然, 瞬时无功功率 $p_q(t)$ 的均值为零, 表示这部分功率不做功, 但它表示负载与电源能量交换的状况。

对于以上几个概念, 特别需要说明的是:

(1) 瞬时电流 $i(t)$ 、瞬时功率 $p(t)$ 是由负载的性质及所加的电压决定的。

(2) 有功电流 $i_p(t) = I_m \cos \varphi \cdot \sin \omega t$ 与电压 $u(t) = U_m \sin \omega t$ 同形、同步, 即 $i_p(t) = C \cdot u(t)$, C 是实常数。

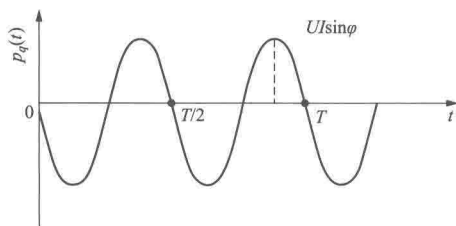


图 1-5 瞬时无功功率波形图

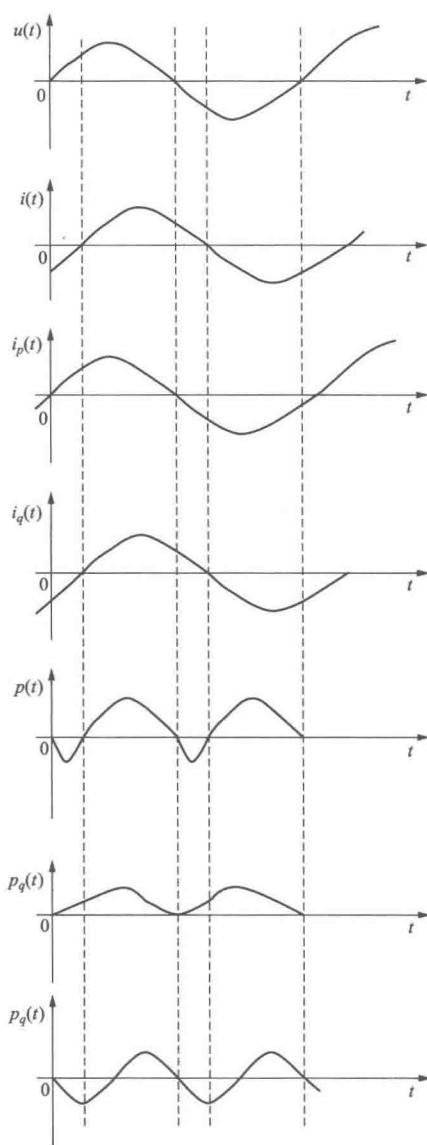


图 1-6 各种功率现象波形图

(3) 无功电流 $i(t) = i_p(t) + i_q(t)$ ，即 $i_q(t) = i(t) - i_p(t)$ ，并且 $i_p(t)$ 与 $i_q(t)$ 正交。

(4) 无功电流同乘电压 $u(t)$ ，就得到 $p(t) = p_p(t) + p_q(t)$ 。

以上诸条在任何波形的条件下都成立。

下面讨论无功现象产生的机理。

(1) 若负载为纯阻性，则电流 $i(t) = \frac{1}{R}u(t)$ ，电流与电压同步、同形，电流 $i(t)$ 就是有功电流 $i_p(t)$ ，无功电流 $i_q(t) = 0$ ，系统中没有无功现象。

(2) 若负载中存在储能元件，或负载是非线性的，电流 $i(t)$ 与电压 $u(t)$ 不同步、不同形， $i(t) \neq i_p(t)$ ，这时电源除向负载提供与电压同步、同形的有功电流 $i_p(t)$ 外，还必须向负载提供一个无功电流 $i_q(t)$ ，使 $i(t) = i_p(t) + i_q(t)$ ，即电源除向负载提供一个有功功率 $p_p(t) = u(t)i_p(t)$ 外，还必须提供一个无功功率 $p_q(t) = u(t)i_q(t)$ ，这个无功功率在电源与负载之间进行流动和交换，但并不做功。这是负载正常工作的必要条件和必然结果，也就是无功现象产生的机理，因此认为只有负载中有储能元件才能产生无功现象的理解是片面的。事实上，负载的非线性是产生无功现象的一个重要原因。这个问题在第五章中还要深入讨论，图 1-6 是线性条件下功率现象的波形图。

1.2 平均功率、无功功率、视在功率、功率因数和复功率

1.2.1 平均功率

平均功率表示负载消耗的有功功率的均值，其表达式为：

$$\begin{aligned} P_{av} &= \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T p_p(t) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i_p(t) dt \end{aligned} \quad (1-6)$$

式中 P_{av} ——平均功率, W;

T ——计算时间, s。

在正弦条件下有功功率为:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T UI [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)] dt = UI \cos \varphi \quad (1-7)$$

式中 P ——有功功率, W。

有功电能为:

$$E = \int P dt \quad (1-8)$$

式中 E ——有功电能, kWh。

1.2.2 无功功率

定义正弦条件下无功功率为:

$$Q = UI \sin \varphi \quad (1-9)$$

式中 Q ——无功功率, var。

无功电能为:

$$E_Q = \int Q dt \quad (1-10)$$

式中 E_Q ——无功电能, kvar。

无功功率是瞬时无功功率 $p_q(t)$ 波形的峰值, 是负载与电源能量交换强度的一个度量。这部分能量不做功, 但占用电网供电设备的容量资源、降低效率、增大线损。当 $\varphi > 0$ 时, 表示感性负载, $\varphi < 0$ 时, 表示容性负载。

为提高电网的运行效率, 通常采用无功补偿的方法, 原理框图如图 1-7 所示, 无功补偿设备的功能是向负载提供无功电流 $i_q(t)$, 这样从电源端看负载, 负载就是一个纯电阻性的器件, 电源只须向负载提供有功电流 $i_p(t)$, 从而提高了电网的运行效率。

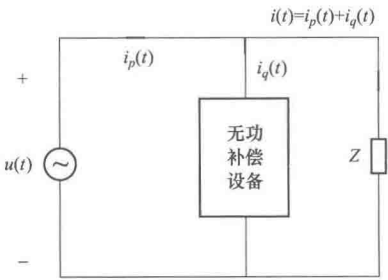


图 1-7 无功补偿原理框图

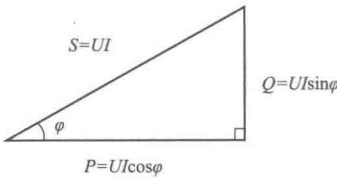


图 1-8 功率三角形

1.2.3 视在功率

视在功率的定义为: $S = UI$, 表示负载可吸收(消耗)的最大功率, 也表示电源可供给的最大功率。在正弦条件下, 有功功率、无功功率、视在功率满足功率三角形, 如图 1-8 所示。

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (1-11)$$

式中 S ——视在功率，VA。

1.2.4 功率因数

功率因数的定义为：

$$P_f = \frac{P}{S} \quad (1-12)$$

式中 P_f ——功率因数。

这个定义在任何波形条件下都成立，在正弦条件下 $P_f = \cos \varphi$ 。显然，提高功率因数，可以充分利用电网设备的容量，从而具有很大的经济意义。

1.2.5 复功率

在正弦条件下电压向量 $\dot{U} = Ue^{j\varphi_u}$ ，电流向量 $\dot{I} = Ie^{j\varphi_i}$ ，复功率定义为：

$$\begin{aligned} \tilde{S} &= \dot{U}\dot{I} \\ &= UIe^{j(\varphi_u - \varphi_i)} \\ &= UIe^{j\varphi} \\ &= UI(\cos \varphi + j\sin \varphi) \\ &= P + jQ \end{aligned} \quad (1-13)$$

式中 $\tilde{S}$ ——复功率，V·A；

$\dot{U}$ ——电压向量，V；

$\dot{I}$ ——电流向量，A。

引用复向量的目的是使功率的计算比较简便。

电能计量方法

本章主要讨论有功、无功电能的一般计量方法。

2.1 有功电能的计量

按照接线方式，有功电能计量可分为单相、三相四线和三相三线电路的计量。本节重点讨论三相电路的有功电能计量方法。有功电能基本计量单元的符号为感应式电能表的符号，如图 2-1 所示。

2.1.1 单相电路有功电能的计量

单相有功电能测量电路如图 2-1 所示。

单相电路有功功率与有功电能分别为：

$$P = UI \cos \varphi \quad (2-1)$$

式中 P ——有功功率，W；

U ——电压有效值，V；

I ——电流有效值，A；

$\cos \varphi$ ——功率因数；

φ ——电流初始相位，rad。

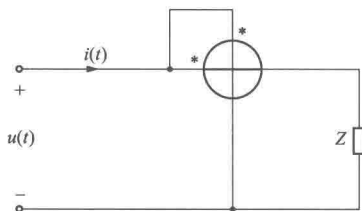


图 2-1 单相有功电能测量电路

$$E = \int P dt \quad (2-2)$$

式中 E ——有功电能，kWh。

2.1.2 三相电路有功电能的计量

2.1.2.1 三相四线电路有功电能的计量

三相四线电路可看成由三个单相电路组成，所以总的电能为各相电能之和，测量电

路如图 2-2 所示。

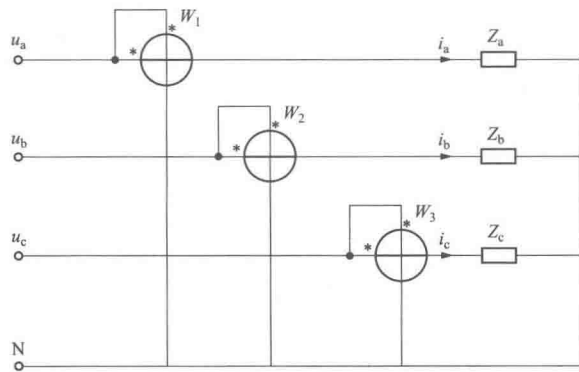


图 2-2 三相四线有功电能测量电路

因为电能与功率仅差一个时间因子，为方便起见，以下用功率表示单位时间内的电能。显然，一般情况下，三相四线电路的平均功率为：

$$P = U_a I_a \cos \varphi_a + U_b I_b \cos \varphi_b + U_c I_c \cos \varphi_c \quad (2-3)$$

式中 P ——平均功率，W；

U_a ——A 相电压有效值，V，B 相、C 相符号意义相同；

I_a ——A 相电流有效值，A，B 相、C 相符号意义相同；

$\cos \varphi_a$ ——A 相功率因素，B 相、C 相符号意义相同；

φ_a ——A 相电流初始相位，rad，B 相、C 相符号意义相同。

当三相对称时，三相四线电路的平均功率为：

$$P = 3U_p I_p \cos \varphi \quad (2-4)$$

式中 U_p ——相电压有效值，V；

I_p ——相电流有效值，A。

该电路适用于对称与不对称电路，对感应式电能表来讲，有三元件三盘式、三元件二盘式和三元件单盘式等结构。

有趣的是当三相对称时，设：

$$\begin{aligned} u_a(t) &= \sqrt{2}U_p \sin \omega t, & i_a(t) &= \sqrt{2}I_p \sin(\omega t - \varphi) \\ u_b(t) &= \sqrt{2}U_p \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right), & i_b(t) &= \sqrt{2}I_p \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi\right) \\ u_c(t) &= \sqrt{2}U_p \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right), & i_c(t) &= \sqrt{2}I_p \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \varphi\right) \end{aligned} \quad (2-5)$$

式中 $u_a(t)$ ——A 相瞬时电压，V，B 相、C 相符号意义相同；

$i_a(t)$ ——A 相瞬时电流，A，B 相、C 相符号意义相同。

可以推出三相的瞬时功率:

$$\begin{aligned} p(t) &= u_a(t)i_a(t) + u_b(t)i_b(t) + u_c(t)i_c(t) \\ &= 3U_P I_P \cos \varphi \\ &= P \end{aligned} \quad (2-6)$$

式中 $p(t)$ ——瞬时功率, W。

该式表明, 正弦三相对称电路任一时刻的瞬时功率值都等于平均功率。因此, 可以用任意时刻的采样值直接算出平均功率, 而不必计算一个周期的平均值。

2.1.2.2 三相三线电路有功电能的计量

(1) Y 型负载。三相三线星型负载的电路如图 2-3 所示。

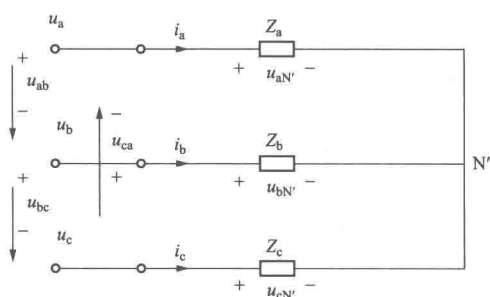


图 2-3 三相三线 Y 型负载电路

从图 2-3 中可得三相三线星型负载电路的平均功率为:

$$P = U_{aN'} I_a \cos \varphi_a + U_{bN'} I_b \cos \varphi_b + U_{cN'} I_c \cos \varphi_c \quad (2-7)$$

式中 $U_{aN'}$ ——A 相相电压, V, B 相、C 相符号意义相同;

I_a ——A 相瞬时电流, A, B 相、C 相符号意义相同。

对于三相三线制电路, 相电压 $U_{aN'}$ 、 $U_{bN'}$ 、 $U_{cN'}$ 不可测量, 因此用上式直接测量每相的有功电能是不可能的。但由基尔霍夫定律 $i_a + i_b + i_c = 0$, 把 $i_b = -(i_a + i_c)$ 代入式 (2-7), 可得瞬时功率:

$$\begin{aligned} p(t) &= u_{aN'} i_a + u_{bN'} (-i_a - i_c) + u_{cN'} i_c \\ &= (u_{aN'} - u_{bN'}) i_a + (u_{cN'} - u_{bN'}) i_c \\ &= u_{ab} \cdot i_a + u_{cb} \cdot i_c \\ &= (u_{aN'} - u_{bN'}) i_a + (u_{cN'} - u_{bN'}) i_c \\ &= u_{ab} \cdot i_a + u_{cb} \cdot i_c \end{aligned} \quad (2-8)$$

式中 $u_{aN'}$ ——A 相相电压, V, B 相、C 相符号意义相同;

i_a ——A 相瞬时电流, A, B 相、C 相符号意义相同;

u_{ab} ——A 相和 B 相之间的线电压有效值, V;

u_{cb} ——B 相和 C 相之间的线电压有效值, V。

因此, 三相三线制电路的平均功率为:

$$P = U_{ab} I_a \cos \varphi_1 + U_{cb} I_c \cos \varphi_2 \quad (2-9)$$

式中 U_{ab} ——A 相和 B 相之间线电压有效值, V;

I_a ——A 相线电流有效值, A;

U_{cb} ——B 相和 C 相之间线电压有效值, V;

I_c ——C 相线电流有效值, A;

φ_1 —— $\dot{U}_{ab}$ 与 $\dot{I}_a$ 的相角;

φ_2 —— $\dot{U}_{cb}$ 与 $\dot{I}_c$ 的相角。

当三相对称时, 三相三线制电路相量图如图 2-4 所示。

图 2-4 中, $U_{ab} = U_{bc} = U_1 = \sqrt{3}U_a = \sqrt{3}U_p$, 其中, U_1 表示线电压有效值; $I_a = I_c = I_1$, I_1 表示线电流有效值; $\varphi_1 = 30^\circ + \varphi_a$; $\varphi_2 = 30^\circ - \varphi_c$ 。

当三相对称时, 三相三线制电路的平均功率为:

$$\begin{aligned} P &= U_1 I_1 [\cos(30^\circ + \varphi) + \cos(30^\circ - \varphi)] \\ &= 2U_1 I_1 \cdot \cos 30^\circ \cdot \cos \varphi \\ &= \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi \end{aligned} \quad (2-10)$$

式中 U_1 ——线电压有效值, V;

I_1 ——线电流有效值, A。

由以上分析, 可以得到二表法的三相三线有功电能的计量方法, 其接线图如图 2-5 所示。

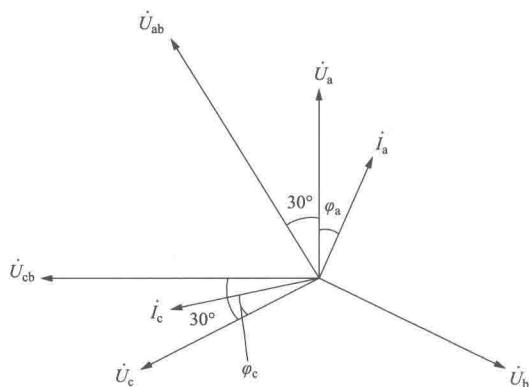


图 2-4 二表法的三相三线制电路相量图

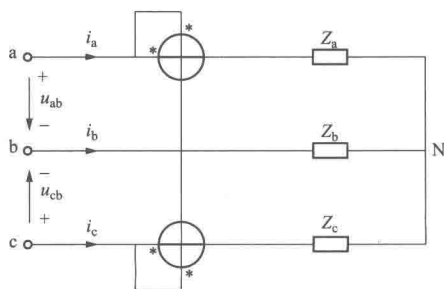


图 2-5 二表法的三相三线有功电能计量接线图

(2) Δ 负载。利用 Δ -Y 变换, 可以把 Δ 型负载等效变换成 Y 型负载, 变换电路如图 2-6 所示, 可以得到相同的结果。

二表法适用于对称和不对称三相三线制电路有功电能的计量, 但不适用三相四线制电路, 因为对于三相四线制电路, 当三相不对称时, 零线电流 $i_N \neq 0$, $i_a + i_b + i_c \neq 0$, 不满足二表法成立的前提条件。

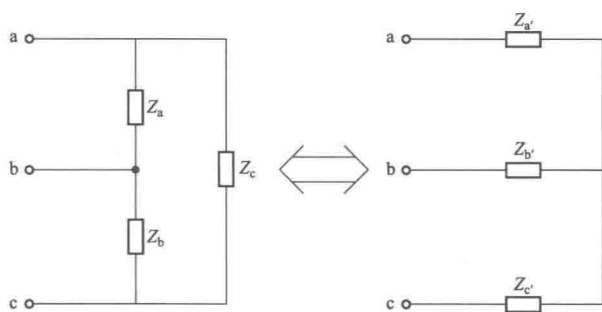


图 2-6 Δ -Y 等效变换电路

2.2 无功电能的计量

为了充分发挥供电设备的运行效率，尽量减少无功电能损耗，加强对供电系统的无功测量和监管是十分重要的。本节所讨论的无功计量方法是基于正弦条件下的经典方法，若用于谐波条件下，将会产生很大的计量误差，这一点需要特别注意。

2.2.1 三相四线电路无功电能的计量

三相四线制电路如图 2-7 所示。

三相四线制电路的无功电能为：

$$Q = U_a I_a \sin \varphi_a + U_b I_b \sin \varphi_b + U_c I_c \sin \varphi_c \quad (2-11)$$

式中 Q ——无功电能，kvar。

当三相对称时，三相电压、电流和相位角分别满足 $U_a = U_b = U_c = U_p$ ， $I_a = I_b = I_c = I_p$ ， $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi$ 。因此，三相四线制电路三相对称时无功电能为：

$$Q = \sqrt{3} U_l I_l \sin \varphi \quad (2-12)$$

在三相对称条件下，瞬时无功功率为：

$$P_q(t) = u_a i_{aq} + u_b i_{bq} + u_c i_{cq} = 0 \quad (2-13)$$

式中 $P_q(t)$ ——瞬时无功功率，var；

i_{aq} ——A 相无功电流，A，B 相、C 相符号意义相同。

式 (2-13) 说明三相电路的无功功率是在三相负载之间进行交换的，但这个交换需要经过电源进行，因此仍需占用供电设备的容量。

2.2.1.1 跨相法

采用跨相法，可以巧妙地使用有功电能表来对无功电能进行计量。图 2-8 是三表跨

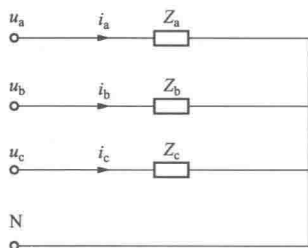


图 2-7 三相四线制电路