

# 电力谐波对电能计量影响的研究

何 群

(四川省电力工业调整试验所, 四川 成都 610072)

**摘 要:** 由于非线性负荷的大量应用, 谐波对电能计量产生影响的问题越来越受到业界的关注, 在介绍了感应式和电子式两类电能表的计量原理的基础上, 采用 MATLAB 仿真工具, 分析了两类计量装置的误差频率特性, 并通过对谐波在线性负载和非线性负载下消耗电能情况的计算公式推导, 指出现行计量方式存在的不合理性, 并提出了一种新型的电能计量方式。

**关键词:** 电能计量; 谐波; 频率特性; 电能表; MATLAB

**Abstract:** Because of a large amount of applications of non-linear load, it attracts more and more attention of power industry to the influences of harmonic on electric energy measurement. After the detailed descriptions of the structures and measuring principles of induction watt-hour meter and electronic watt-hour meter, the frequency characteristic curves of the two types are simulated by the tool of MATLAB. A new electric energy measuring standard is given based on the expression formula of the electric energy consumed by linear loads and non-linear loads.

**Key words:** electrical energy measurement; harmonic; frequency characteristic; watt-hour meter; MATLAB

**中图分类号:** TM93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)-0045-04

电能是国民经济和人民生活的主要能源, 对国家的发展起着举足轻重的作用。电能计量数据直接涉及发电、供电、用电三方的经济利益, 同时也是许多技术指标计算的重要依据。然而随着电力电子装置等非线性负荷的大量应用, 整个电力系统被引入了大量谐波, 严重影响了电能计量的准确性和合理性。谐波对于电力系统来说是完全有害的, 目前, 世界各国都对谐波问题予以了充分的重视, 加强了对电力谐波问题的研究。通过谐波对电能计量影响的分析, 提出了一种改进的电能计量方式。

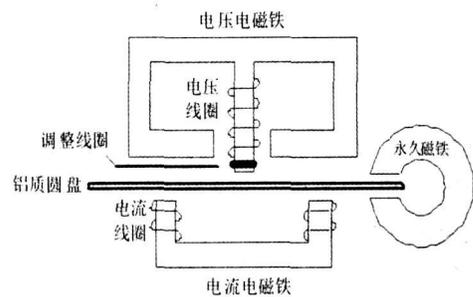


图 1 感应式电能表工作原理示意图

当转动力矩  $M$  与制动力矩  $M_b$  相等的时候铝盘将以匀速转动, 此转速  $N$  正比于电路的功率:

$$N = \frac{k}{k_c} P = kP \quad (3)$$

3) 计数装置是一个十进制的机械式计数器, 用来记录铝盘转数。

$$N = \int_0^t n dt = k \int_0^t P dt = kE \quad (4)$$

$$E = \frac{1}{k} N = CN \quad (5)$$

$C$  称为电能表常数。铝盘转数乘以常数  $C$  就是被测电路消耗的电能。

## 1.2 电子式电能表工作原理

电子式电能表的结构主要包括: 输入部分、乘法器、积分部分、输出部分。其工作原理示意图如图 2 所示。电子式电能表工作原理是通过电压采样和电

## 1 电能表的计量原理

### 1.1 感应式电能表结构及工作原理

感应式电能表由驱动装置、制动装置、计数装置三部分组成, 其结构及工作原理示意图如图 1 所示。

1) 驱动装置由电压电磁铁、电流电磁铁和装于轴上的铝质圆盘构成。用来产生驱动力矩, 驱动力矩正比于被测电路消耗的功率:

$$M = k_i P \quad (1)$$

2) 制动装置由永久磁铁与圆型铝盘构成, 大小正比于铝盘的转速:

$$M_b = k_c n \quad (2)$$

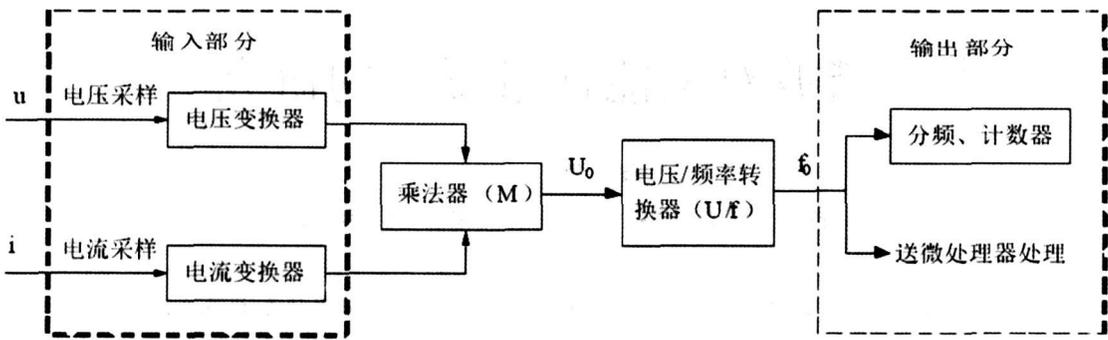


图 2 电子式电能表工作原理示意图

流采样,将电压信号和电流信号送入乘法器得到功率,然后通过积分电路,也就是进行 V/F 压频变换,得到对应的频率,通过对频率信号计数得到被测电路消耗的电能值送至输出。

## 2 谐波对电能计量准确性影响的理论分析

电能计量装置是针对工频正弦波电压设计的,由于谐波的存在使得电能计量装置偏离约定的计量环境状态,产生误差。谐波是一个周期电气量的正弦波分量,其频率为基波频率的整数倍,从理论上讲任何周期性波形都可以将它分解为傅里叶级数来进行分析,也就是进行频域分析,因此电能计量装置的频率特性是研究基波变形对电能计量影响的重要依据。

### 2.1 感应式电能表的频率特性

根据已经建立的感应式电能表频率特性模型,采用 MATLAB 数学工具软件模拟仿真,将数据直接进行图形化处理,可以直观方便地展示输入、输出之间的关系。通过程序计算绘图,可以得到感应式电能表的误差频率特性曲线如图 3 所示。图中多条曲线分别为不同功率因数下的感应式电能表误差情况。

1) 感应式电能表的电能计量误差频率特性曲线呈迅速下降趋势,即感应式电能表在计量高频电能时,会出现负误差;

2) 计量误差随频率的增高而增大,当频率为 1000 Hz 左右时,误差超过了 -90%;

3) 不同功率因数下的误差值有一定的差异。

### 2.2 电子式电能表的误差频率特性

电子式电能表的误差频率特性曲线如图 4 所示。从仿真结果看,随着频率升高,误差值增大,整个曲线近似为一个二次曲线。和感应式电能表相同,电子式电能表计量误差随着谐波频次的升高而增加,但总体来看,电子式电能表计量误差比感应式电能表计量误

差小得多,20 次谐波频率特性误差值不超过 4%。

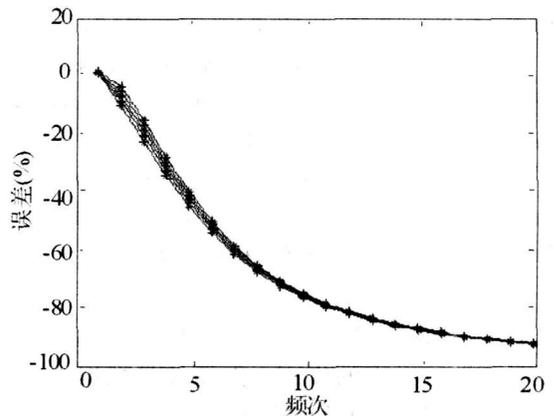


图 3 感应式电能表误差频率特性曲线

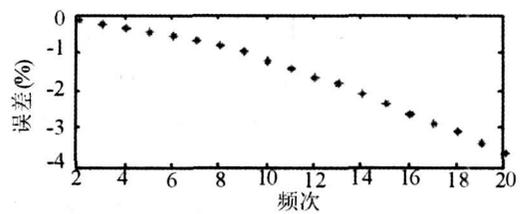


图 4 电子式电能表误差频率曲线

### 2.3 感应式电能表和电子式电能表的误差频率特性比较

将感应式电能表和电子式电能表的误差频率特性曲线绘制到一张图上,如图 5 所示。可以看出:感应式电能表随着高次谐波的增加,误差频率特性曲线衰减很严重,而电子式电能表的误差频率曲线则相对平坦,这说明电子式电能表具有较宽的频率响应特性。

从以上分析可以看出:感应式电能表有迅速下降的误差频率特性,使得感应式电能表只能计量谐波的一部分。若以  $W_1$  表示基波电能,  $W_n$  表示谐波电能,  $W$  表示电能表所计量的电能,则感应式电能表反映的电能值近似可表示为:

$$W = W_1 + \sum K_n W_n \quad (6)$$

其中:  $K_n$  为谐波电能系数,表征谐波被计量的程

度,显然  $K_n < 1$ ,且随谐波频率次数增加而减少。

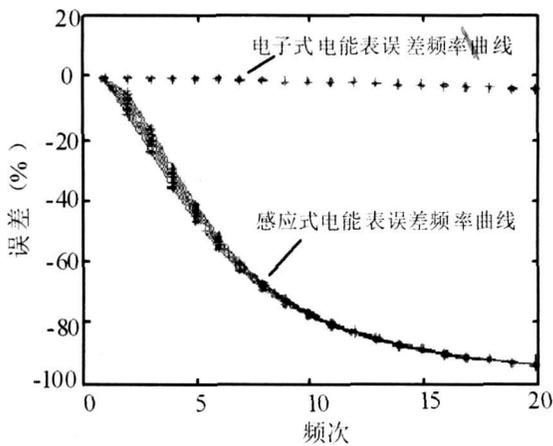


图 5 两种电能表误差频率特性曲线比较

而对电子式电能表的仿真分析结果表明,和感应式电能表测量基波电能和部分谐波电能不同,电子式电能表误差频率特性曲线变化较为平缓,即电子式电能表测量基波电能和几乎全部谐波电能。因此电子式电能表测量可近似表示为:

$$W = W_1 + \sum W_n \quad (7)$$

在以全能量为计量标准的计量中,电子式电能表的计量误差接近于零,但是以基波为计量标准的计量中,电子式电能表的计量误差将比感应式电能表的计量误差大。

### 3 现阶段电能计量方式的探讨

#### 3.1 谐波作用下电能计量的方式

目前在谐波作用下电能计量有 3 种方式。

- 1) 电能表要准确反映实际功率,即基波和谐波的综合功率,称为全能量方式;
- 2) 电能表仅仅反映基波功率,不计谐波功率,称为基波电能方式;
- 3) 电能表分别计量基波功率和谐波功率,称为谐波电能方式。

由于目前国内采用的是全能量的电能计量方式,使得在谐波作用下电能计量的准确性和合理性都产生了问题。

#### 3.2 谐波功率对现行计量方式合理性的影响

中国采用的全能量的计量方式,在基波情况下能够准确地反映出用户的用电情况,但是在谐波作用下,就会产生较大的差异,下面通过一个简化的电力系统模型,分析在谐波情况下的电能计量情况。

图 6 为一含有非线性负载和线性负载的简单的系统等效模型,图中电压源 S 电压为  $u_s(t)$ ,  $u(t)$  是用

户与电网公共连接点 PCC 处的电压, Z 是电源内阻和线路阻抗;  $Z_H$  和  $Z_M$  分别代表非线性负载和线性负载;  $I_{H1}$  和  $I_{M1}$  分别为非线性负载和线性负载吸收的基波电流有效值;  $I_{Hh}$  为非线性负载向电网中注入的 h 次谐波电流有效值;  $I_{MHh}$  为线性负载吸收的来自于非线性负载的 h 次谐波电流有效值;当电源中含有谐波时,  $I_{HSh}$  和  $I_{MSh}$  分别为非线性负载和线性负载从电源中吸收的 h 次谐波电流有效值。

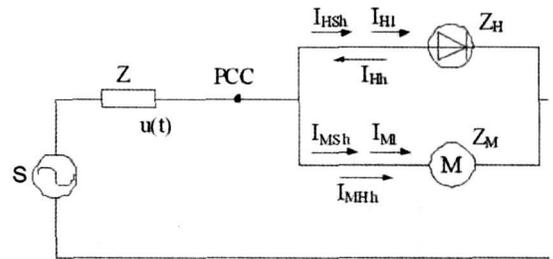


图 6 含线性和非线性负载的简化电力系统模型

下面就电源电压波形畸变和无畸变两种情形,研究电能计量所受到的影响。设电源电压中含有的最高次谐波次数为 M,则设电压  $u(t)$  为

$$u(t) = \sqrt{2}U_1 \cos(\omega t + \Phi_{u1}) + \sum_{h=2}^M \sqrt{2}U_{Sh} \cos(h\omega t + \Phi_{uSh}) + \sum_{h=2}^N \sqrt{2}U_{Hh} \cos(h\omega t + \Phi_{uHh}) \quad (8)$$

式中,  $U_1$ ——PCC 点处的基波电压有效值;

$N$ ——非线性负载所产生的谐波电压的最高次谐波次数;

$U_{Hh}$ 、 $U_{Sh}$ ——分别为由电源所含谐波和由非线性负载发出谐波在 PCC 点引起的 h 次谐波电压有效值;

$\Phi_{uSh}$ 、 $\Phi_{uHh}$ ——电压源和非线性负载这两个谐波源在 PCC 点 h 次谐波电压的初相角;

$\Phi_{u1}$ ——PCC 点的电压基波分量的初相角。

设流经非线性负载的电流  $i_h(t)$  和线性负载的电流  $i_m(t)$  分别为:

$$i_h(t) = \sqrt{2}I_{H1} \cos(\omega t + \Phi_{H1}) + \sum_{h=2}^M \sqrt{2}I_{HSh} \cos(h\omega t + \Phi_{HSh}) - \sum_{h=2}^N \sqrt{2}I_{Hh} \cos(h\omega t + \Phi_{Hh}) \quad (9)$$

$$i_m(t) = \sqrt{2}I_{M1} \cos(\omega t + \Phi_{M1}) + \sum_{h=2}^M \sqrt{2}I_{MSh} \cos(h\omega t + \Phi_{MSh}) + \sum_{h=2}^N \sqrt{2}I_{MHh} \cos(h\omega t + \Phi_{MHh}) \quad (10)$$

式中,  $\Phi_{HSh}$ 、 $\Phi_{MSh}$ ——非线性负载和线性负载从系统中吸收的 h 次谐波电流的初相角;

$\Phi_{hh}$ ——非线性负载发出的  $h$  次谐波电流初相角, 有效值前的负号表示电流实际方向与参与方向相反;

$\Phi_{Mhh}$ ——线性负载吸收的由非线性负载发出的  $h$  次谐波电流初相角;

$\Phi_{H1}$ 、 $\Phi_{M1}$ ——非线性负载和线性负载的基波电流初相角。

计算得非线性负载  $Z_H$  吸收的有功功率  $P_H$  为:

$$P_H = U_{H1} I_{H1} \cos\Phi_{H1} + \sum_{h=2}^N U_{Sh} I_{Sh} \cos\Phi_{HSh} - \sum_{h=2}^N U_{Hh} I_{hh} \cos\Phi_{Hh}$$
$$= P_{H1} + P_{Hs} - P_{Hh} \quad (11)$$

式中,  $P_{H1}$ 、 $P_{Hs}$ ——分别为非线性负载吸收的基波和背景谐波有功功率;

$P_{Hh}$ ——为非线性负载发出的谐波有功功率, 负号表示向系统注入谐波功率。

则非线性负载在一个周期内消耗的电能  $E_{Ht}$  为:

$$E_{Ht} = \int_0^T P_H dt = \int_0^T (P_{H1} + P_{Hs} - P_{Hh}) dt$$
$$= E_{H1} + E_{Hs} - E_{Hh} \quad (12)$$

式中,  $E_{Hs}$ ——表示电网中的背景谐波在非线性负载  $Z_H$  上引起的谐波电能损耗;

$E_{Hh}$ ——表示非线性负载  $Z_H$  向电网中注入的谐波电能。

同理, 可求出线性负载  $Z_M$  在一个周期内消耗的电能  $E_{Mt}$  为:

$$E_{Mt} = \int_0^T P_M dt = \int_0^T (P_{M1} + P_{Msh} + P_{MH}) dt$$
$$= E_{M1} + E_{Msh} + E_{MHh} \quad (13)$$

式中,  $E_{M1}$ ——线性负载吸收的基波电能;

$E_{Msh}$ 、 $E_{MHh}$ ——线性负载消耗的分别由系统和非线性负载两个谐波源提供的电能。

上述等式都是在电源电压波形畸变的前提下得到的, 当电源电压为工频正弦波时, 式 (11)~式 (13) 右边不含中间项, 而其他两项不变。可求得两种负载在一个周期内消耗的电能:

$$E_{Ht} = \int_0^T P_H dt = \int_0^T (P_{H1} - P_{Hh}) dt = E_{H1} - E_{Hh} \quad (14)$$

$$E_{Mt} = \int_0^T P_M dt = \int_0^T (P_{M1} + P_{MH}) dt = E_{M1} + E_{MHh} \quad (15)$$

比较两种情况下非线性负载和线性负载吸收电能的表达式 (12)~式 (15) 可以看出: 由于谐波功率的大小和方向的影响, 无论电源电压波形是否畸变, 只要系统中存在谐波功率, 线性负载实际消耗的电能就大于其吸收的基波电能 ( $E_M > E_{M1}$ )。而在一般情况下, 非线性负载从系统吸收的背景谐波电能小于其向系统注入的谐波电能 ( $E_{Hh} < E_{H1}$ ), 所以非线性负载

实际消耗的电能值要小于其吸收的基波电能值 ( $E_{Ht} < E_{H1}$ )。

非线性负载吸收其所需基波电能的同时又向系统注入谐波电能, 线性负载吸收基波电能的同时又被迫吸收了谐波电能。而不论是对于线性负载还是非线性负载, 谐波电能都是有害的, 电动机所做的功只和它从电网吸收的基波电能成正比, 不会由于从谐波源送来的谐波电能而多做功。

如果按现行的电能计量方式, 电能表反映的是基波和谐波的综合电能 ( $E_{Ht}$  或  $E_M$ )。这就导致用户实际消耗基波电能 ( $E_1$ ) 与电能表读数不等。按电能表读数缴费就会使非线性负载向系统注入谐波功率反而少缴电费, 而线性负载受到谐波污染却要多交电费, 这显然是不合理的。

#### 4 一种建议的新型电能计量方式

为解决谐波对电能计量准确性及合理性的影响这一问题, 需要确定新的计量方式。在分析某个特定用户与配电网的相互影响时, 可以将单一正弦电压源供电的多用户配电网等效为一个由多电源 (正弦电压源与背景谐波源) 供电的单用户电网, 电网与某一负荷间的关系可以总结为以下几种情况:

1) 电网无背景谐波, 负荷为线性负荷, 此时没有谐波功率;

2) 电网无背景谐波, 负荷为非线性负荷, 此时有谐波功率由负荷流向电网, 谐波功率为负, 负荷为谐波发生源;

3) 电网有背景谐波, 负荷为线性负荷, 此时有谐波功率由电网流向负荷, 谐波功率为正, 负荷为谐波吸收源;

4) 电网有背景谐波, 负荷为非线性负荷, 这是最为普遍的一种情况, 此时谐波功率有正也有负, 当谐波总和为正时可以将负荷看作谐波吸收源, 为负时看作谐波发生源, 因此第二、第三种情况可以视为第四种情况的特殊情况, 在谐波分析时只考虑第四种情况即可。

发电机提供的电源近乎纯正弦波电压源, 因而, 电网中消耗的谐波能量是由电网中各个电力用户的非线性负荷引起的。因此, 由某个电力用户所引起的配电网谐波电能损耗理应由该用户来承担。电力用户希望电网提供纯正弦波电压源, 因而, 由电网背景谐波源在电力用户中引起的谐波电能损耗理应由电

网来承担。假设负荷吸收的基波电能为  $W_1$ , 吸收的谐波电能为  $W_{in}$ , 发出的谐波电能为  $W_{out}$  (这里  $W_{in}$ 、 $W_{out}$  仍以基波电能方向为基准, 与基波方向同向为正, 反向为负), 在电能量收费时可以按照下式对以上 3 种电能进行区别对待:

$$\text{电费} = C_1 W_1 - C_{in} W_{in} + C_{out} W_{out} \quad (16)$$

$C_1$ 、 $C_{in}$  和  $C_{out}$  分别是负荷消耗的基波电能电价、负荷吸收的谐波电能电价及负载产生的谐波电能电价。这里规定:

$$C_{in} \leq C_1 \leq C_{out} \quad (17)$$

依据此电费数学模型对用户进行收费, 将有效地起到通过经济手段, 迫使用户采取措施减小注入电网的谐波量, 同时对受谐波危害的用户进行部分补偿的作用, 有利于电能计量的准确性和公平性。

采用这种建议的计量方式需要设计、制造新型电子式电能计量装置, 由于它的原理相对复杂, 成本会比较高。但是如果所研究的标准和定义是建立在科学基础上的, 这些研究工作将会有力地促进电测仪表的发展和改进。随着电子技术的不断发展, 相信这种计量方式将会在技术、经济、政策等方面得到支持, 在众多的研究、生产、管理部门的共同努力下电能计量将越来越准确、合理。

## 参考文献

- [1] 韩宵汉. 电子式电能表的应用浅析 [J]. 浙江电力, 1997 (1).
- [2] 李长宇, 舒乃秋, 彭辉, 等. 基于 RTDS 的谐波对电能计量影响的仿真分析 [J]. 继电器, 2004, 32(16): 25-27.
- [3] 同向前, 余健明, 薛钧义. 电网谐波电能损耗的计量方法 [J]. 西安理工大学学报, 2002, 18(2): 181-184.
- [4] Baghzouz Y. et al Harmonic analysis of induction wattour meter performance IEEE Trans on Power Apparatus and Systems 1985, 104(2): 399-406.
- [5] Duane Hanselman, Bruce Littlefield 李人厚, 张平安, 等译校. 精通 MATLAB 综合辅导与指南 [M]. 西安交通大学出版社, 1998 年第 1 版.

### 作者简介:

何群, 高级工程师, 1993 年毕业于重庆大学电气工程系电磁测量及仪表专业, 取得学士学位, 在四川省电力工业调整试验所承担电测计量工作。2003 年就读于北京理工大学计算机科学与工程系, 取得工学硕士学位, 现在在四川省电力工业调整试验所承担电测计量技术监督工作, 并受聘四川大学计算机科学与工程学院副教授。

(收稿日期: 2008-10-14)

# 成都局计量中心跃升“国家实验室”

2009 年元旦前夕, 中国合格评定国家认可委员会 (CNAS) 国家级权威评审专家们进行为期三天客观、公正、严格、细致的现场评审后正式宣布: 国家电网四川成都电业局电能计量中心顺利通过了“国家实验室”现场评审, 成为中国西部地区第一家地市级电能计量“国家实验室”。

这就意味着成都局电能计量中实验室质量管理及控制水平实现了质的飞跃, 一举跃升为“国家级电能计量检测机构”。今后, 成都局电能计量中心在 CNAS 认可业务范围内授权出具的质量报告, 将被世界上 54 个国家和地区的政府及国际大公司所认可。

成都局电能计量中心是根据《四川省电力公司电能计量中心建设指导性意见》和成都局城区单位体制改革试点设立的主业二级单位, 2007 年 1 月挂牌成立, 当年 7 月正式全面运营。该中心成立以来, 克服了人才资源和物质条件严重不足的困难, 在全川电能计量中心中第一家通过了 ISO 9001 质量管理体系 A 级优质客户认证, 取得了 JJF 1069 法定计量检定机构考核认证。

与此同时, 该中心的建设工作也取得了阶段性成果——将该计量中心初步建设成了集约化、规模化、专业化、标准化和现代化的全川最大型电能计量专业检测机构。国家电网公司、四川省电力公司和省(市)质量技术监督局的有关领导和权威技术专家到该中心实地检查和指导工作后, 均给予了高度评价, 一致认为该中心在建设、生产、运营、管理等方面都走在了全川前列。

据悉, 今后中国合格评定国家认可委员会 (CNAS) 每年都将派考评专家到该中心进行了一次监督考评, 以确保“国家实验室”的技术权威性。

(摘自《西南电力报》)