

# 谐波对电网中有功计量装置的影响

李斌勤<sup>1</sup>, 陈伟根<sup>1</sup>, 李刚<sup>2</sup>

(1. 高电压与电工新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆市 沙坪坝区 400044;

2. 重庆电力高等专科学校, 重庆市 九龙坡区 400053)

## Analysis on Affects of Harmonics on Active Energy Metering Devices

LI Bin-qin<sup>1</sup>, CHEN Wei-gen<sup>1</sup>, LI Gang<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of High Voltage and Electrical New Technology (Chongqing University), Ministry of Education, Shapingba District, Chongqing 400044, China; 2. Chongqing Electric Power College, Jiulongpo District, Chongqing 400053, China)

**ABSTRACT:** Along with the wide application of nonlinear power electronic devices in power grids, harmonic pollution in power systems becomes more and more severe. Most instrument transformers and watt-hour meters installed in power systems are designed to measure power frequency signals with sinusoidal waveform, the measurement accuracy of these measuring devices will be affected by distorted waveform to a certain extent. Based on the frequency response characteristics of active power measuring devices, the affects of harmonics on measurement error of different kinds of measuring devices are analyzed, and the defects of existing active power measurement mode are pointed out and related suggestions are given.

**KEY WORDS:** harmonics; frequency response characteristic; active energy measurement devices; measurement error; measuring manner of electric energy

**摘要:** 随着非线性负荷的广泛应用, 电网谐波污染日益严重。电力系统中使用的计量用互感器、有功电能表大多针对工频正弦波设计, 畸变波形对其计量准确度产生了不同程度的影响。基于有功计量装置的频率响应特性分析了电力谐波对不同计量装置的误差影响情况, 并提出了目前电网有功计量方式的问题和建议。

**关键词:** 电力系统谐波; 频率响应特性; 有功计量装置; 计量误差; 电能计量方式

## 0 引言

随着电力电子装置在电力系统中的广泛应用以及非线性负荷的日益增多, 电网谐波污染愈演愈烈, 致使电能质量恶化。谐波污染不仅危及某些电压敏感负荷的正常运行, 也直接影响到电能的正确计量。电网中有功计量装置是发电企业、输配电企业、电力用户之间进行交易结算的重要依据。由于这些计量装置大多按在工频正弦波形条件下运行

而设计, 波形畸变必然使其计量结果失准。目前, 在谐波对有功电能计量影响的理论分析中往往忽视谐波对计量用互感器的影响, 本文基于计量用互感器的频率特性, 分析了谐波对整套有功计量装置测量误差的影响, 并提出谐波干扰下电网有功计量方式存在的问题和相关的建议。

电力系统的谐波中, 除了与基波成整数倍的谐波外, 还存在许多与基波成非整数倍的间谐波, 它们都对电力系统的计量产生不良影响。本文的研究仅涉及与基波成整数倍的谐波对计量用互感器及有功电能表的影响。

## 1 电力系统谐波的来源

将频率为系统基波频率整数倍的正弦电压或电流定义为电力系统谐波, 是导致电压和电流波形畸变的主要原因。电力系统中的谐波有3个来源: 一是发电机和电力变压器产生的谐波, 国家标准对此有严格的规定, 其对测量装置的影响可以不计; 二是输变电网的电力电子设备如 TCSC、SVC 等产生的谐波<sup>[1-4]</sup>; 三是非线性用电负荷产生的谐波。统计表明, 非线性用电负荷是电力系统最大的谐波源<sup>[5]</sup>。谐波电流在电网中产生有功功率损失并构成电网线损的一部分, 对电网的经济运行很不利。

## 2 谐波有功的产生机理及潮流

当电压、电流为非正弦波即存在谐波的情况下, 根据有功功率定义及三角函数的正交性可知, 同频率的电压和电流才构成有功功率, 而不同频率的电压和电流并不构成有功功率, 即

$$P = U_1 I_1 \cos \varphi_1 + \sum U_h I_h \cos \varphi_h = P_1 + \sum P_h \quad (1)$$

式中,  $P_1$  为基波有功功率;  $h$  为谐波次数;  $U_h$ 、 $I_h$  分别为  $h$  次谐波的电压和电流;  $P_h$  为  $h$  次谐波有功功率。习惯上规定用户吸收的有功功率为正, 发出的有功功率为负。

一般谐波源只在几个主要频率上送出谐波有功功率而在其它频率上可能是吸收有功功率的, 但由谐波源送到电力系统的谐波功率净值一般是正的, 即  $\sum P_h > 0$ , 谐波源将从电网吸收的部分基波有功功率转化为谐波功率后, 反馈至电网并危害其它用户<sup>[6]</sup>。图 1 所示的基波和谐波潮流示意图直观地示出基波和谐波下的功率流向<sup>[7]</sup>。

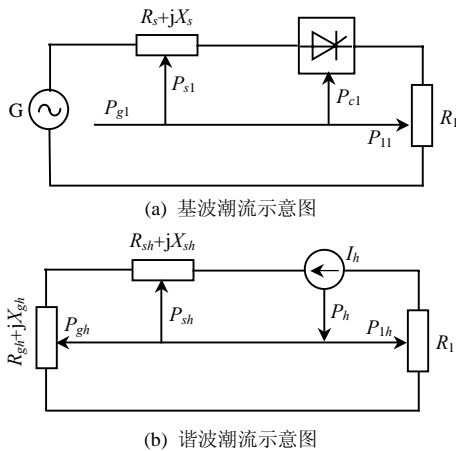


图 1 基波与谐波潮流的示意图

Fig. 1 Diagram of fundamental power flow and harmonic power flow

图 1(a)中发电机  $G$  经过线路阻抗  $(R_s + jX_s)$  向纯电阻负荷  $R_1$ (线性负荷)和静止变流器(非线性负荷)馈电, 其大部分  $P_{11}$  输入  $R_1$ , 小部分  $P_{c1}$  在静止变流器中转换成不同频率的谐波功率, 此外, 在输电线路和发电机电阻中还有一些工频附加有功功率损耗  $P_{s1}$ , 故基波有功功率平衡式为

$$P_{g1} = P_{11} + P_{c1} + P_{s1} \quad (2)$$

图 1(b)中, 交流线路和发电机分别用谐波阻抗  $(R_{sh} + jX_{sh})$  和  $(R_{gh} + jX_{gh})$  表示, 用谐波电流源表示静止变流器。基波功率  $P_{c1}$  中的一小部分转换为谐波功率  $P_h$ ,  $P_h$  中的一部分  $P_{sh}$  消耗在系统电阻中, 另一部分  $P_{gh}$  消耗在发电机电阻中, 其余部分  $P_{1h}$  消耗在纯电阻负荷  $R_1$  中, 故谐波功率平衡式为  $P_h = P_{sh} + P_{gh} + P_{1h}$ , 这表明, 非线性负荷发出的谐波功率被系统中的电源、馈电线路和线性负荷所吸收。因非线性负荷产生的谐波功率是由非线性负荷从系统中吸收的基波功率转化而来的, 因此可根据谐波有功功率的正负来判断并区别谐波源和吸收谐波的负荷。

### 3 谐波对电网中有功计量装置的影响分析

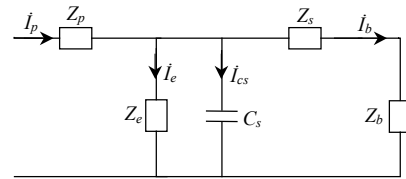
#### 3.1 谐波对测量用互感器的误差影响分析

电网中有功计量装置包括有功电能表和与之配套的电压互感器(TV)及电流互感器(TA), 计量结果是供电企业收取电费和考核线损的基础和依据, 其准确性至关重要, 故分析电网谐波对有功计量装置的影响具有重要的现实意义。

电网中计量有功电能时, 高电压、大电流信号首先经测量用互感器转换成与电表匹配的信号后再进入表计, 因此互感器的准确度直接影响着电能计量的精度<sup>[8]</sup>。如果互感器存在非线性, 当畸变的电压、电流信号经过互感器时, 互感器对各次谐波成分的转换比例就不一致, 使进入有功电能表的信号严重偏离实际, 致使计量结果误差增大<sup>[9]</sup>。为此, 首先研究谐波作用下互感器的频率特性。

##### 3.1.1 电流互感器的频率特性分析

电流互感器 TA 的等值电路如图 2 所示。



$Z_p$ : TA 一次侧等效阻抗;  $Z_e$ : 激磁阻抗;  $Z_b$ : 负载阻抗;  $Z_s$ : TA 二次侧等效阻抗;  $C_s$ : TA 二次侧对地电容。

图 2 电流互感器等值电路

Fig. 2 Equivalent circuit of current transformer

由图 2 可导出表示 TA 性质的比例校正系数:

$$k_{RCF} = \frac{\dot{I}_b + \dot{I}_e + \dot{I}_{cs}}{\dot{I}_b} = 1 + \frac{Z_s + Z_b}{Z_{cs}} + \frac{Z_s + Z_b}{Z_e} \quad (3)$$

要使 TA 误差小  $k_{RCF}$  的值应接近于 1, 这就要求  $Z_{cs}$ 、 $Z_e$  的值越大越好, 而  $Z_s$  的值则是越小越好。TA 的频率响应主要由其电容及阻抗决定。

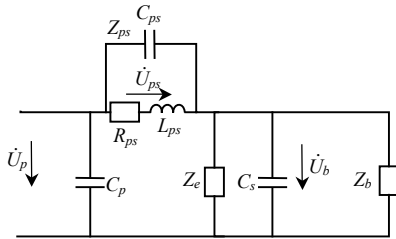
准确度级别较高的 TA 一般采用磁性能较好的材料制造, 且在设计时选取较低的工作磁通密度。正常情况下, TA 运行在磁化特性曲线的线性部分, 远离磁饱和区, 这有利于增大  $Z_e$ 、减小  $Z_s$ 。

频率增高会使激磁阻抗  $Z_e$  增大, 同时  $Z_{cs} = 1/(\omega C_s)$  会减小, 使  $k_{RCF}$  值增大, TA 的误差也随之增加。研究表明, 只要  $C_s$  限制在  $10^{-9}$  数量级以内, 就电网中畸变谐波的频率范围而言,  $Z_{cs}$  的值仍是很高的, 故  $\dot{I}_{cs}$  在 TA 的二次侧电流中所占份额仍很小。总体而言, 50 次及以下频率谐波对 TA 的影响都可忽略不计。

##### 3.1.2 电压互感器的频率特性分析

广泛应用于中低压水平的电磁式电压互感器

(TV)是设计在基频下工作的，作出其在较宽频带下的电路模型如图 3 所示。



$Z_{ps}$ : TV 一、二次侧间等效漏阻抗与漏电容形成的总等效串联阻抗;  
 $Z_e$ : 激磁阻抗;  $Z_b$ : 负载阻抗;  $C_p$ : TV 一次侧对地电容;  
 $C_s$ : TV 二次侧对地电容。

图 3 电压互感器等值电路

Fig. 3 Equivalent circuit of potential transformer

由图 3 可导出表示 TV 性质的比例校正系数:

$$k_{RCF} = \frac{(N_s / N_p) \dot{U}_p}{\dot{U}_b} = \frac{\dot{U}_{ps} + \dot{U}_b}{\dot{U}_b} = 1 + Z_{ps} \left( \frac{1}{Z_b} + \frac{1}{Z_e} + \frac{1}{Z_{cs}} \right) \quad (4)$$

式中:  $N_s/N_p$  为电压互感器变比;  $U_p$  为原边电压;  $U_b$  为副边电压;  $U_{ps}$  为在总等效串联阻抗上的压降。

可见, TV 在谐波条件下运行时, 原、付边漏阻抗、漏电容、激磁阻抗、付边负载阻抗等会引起附加误差, 要使 TV 误差尽可能小, 就必须尽量增大  $Z_b$ 、 $Z_e$ 、 $Z_{cs}$  而减小  $Z_{ps}$ , 才能令  $k_{RCF}$  值尽量接近于 1。

增大负载阻抗  $Z_b$  的办法是尽量使 TV 工作在欠额定负载条件下, 加大激磁阻抗  $Z_e$  的方法是使 TV 磁路工作在低磁通密度区域, 而减小  $Z_{ps}$  的途径是降低绕组电阻和减小绕组的漏抗。

研究表明, 当谐波频率低于 1 kHz(即谐波次数低于 20 次)时, 大部分 0.5 级及以上的电磁式 TV 具有较好的频率特性。频率更高的谐波分量会引起 TV 二次侧输出波形失真, 这是因为频率越高, 互感器漏阻抗和涡流影响愈大, 使  $k_{RCF}$  值增大。但电网中这种高次谐波成分几乎可忽略不计。

此外, 在相当一部分 110kV、220kV 及以上电压等级的电网中通常装设电容式电压互感器(CVT), CVT 结合了一个电容分压器和一个电磁式电压互感器, 降低了电磁单元对绝缘的要求, 因此价格低, 使用安全。但电容分压器提供的附加电容会对 CVT 的频率响应产生影响, 故大部分型号的 CVT 幅频特性和角频特性都较差, 不能满足谐波测量的要求, 所以电容式电压互感器不适用于谐波作用下的电能计量<sup>[6]</sup>。

### 3.2 谐波对有功电能表的误差影响分析

有功电能表是电能计量的核心器件, 目前电网中普遍使用的有功电能表主要有感应式电能表和全电子式电能表两大类, 其频率特性是研究畸变波形下电能表运行状况的重要依据。

#### 3.2.1 感应型有功电能表的误差频率特性

在被计量信号含有谐波的情况下, 综合考虑与感应型有功电能表计量误差有关的各个因素, 如线圈磁路的饱和、调整线圈的作用、频率对电压线圈及圆盘参数的影响等, 可得到感应型有功电能表在基波上叠加  $k$  次谐波时圆盘的转速为

$$s = \frac{\sum k \omega C_k \Phi_{uk}'' \Phi_{ik}'' \sin(k\alpha_{uk} + \delta_k - k\theta_{uk} + k\theta_{ik})}{K_1 + \sum_k \frac{1}{2} C_k (K_2 \Phi_{uk}''^2 + K_3 \Phi_{ik}''^2)} \quad (5)$$

式中:  $C_k = \frac{\cos \alpha_{dk}}{Z_{dk}}$ ;  $\alpha_{dk}$  为  $k$  次谐波转盘等效阻抗角;  $Z_{dk}$  为  $k$  次谐波转盘等效阻抗幅值;  $\Phi_{uk}''$ 、 $\Phi_{ik}''$  为有效电压、电流工作磁通, 和磁路饱和系数有关;  $\delta_k$  为调整相位角;  $\theta_{uk}$ 、 $\theta_{ik}$  为谐波电压、电流初相;  $\alpha_{uk}$  为  $k$  次谐波下电压线圈阻抗角;  $K_1$  为永久磁场制动转矩系数;  $K_2$  为电压磁通制动转矩系数;  $K_3$  为电流磁通制动转矩系数<sup>[10-11]</sup>。

将频率设为基波频率, 则得到基波作用下转盘的转速  $s_1$ , 于是由式(5)解出的  $s$  值和此  $s_1$  的值可求得电能表的误差为

$$\delta\% = \frac{s - s_1}{s} \times 100\% \quad (6)$$

按照式(5)和式(6), 采用电能表手册中不同型号的电能表的参数及从资料中查得的典型数值, 用计算程序进行计算, 并按照计算结果绘图, 得到图 4 所示的感应式有功电能表误差频率特性曲线簇。

由图 4 可见, 对不同次数的谐波进行计量时, 感应式有功电能表产生不同的计量误差。随着谐波

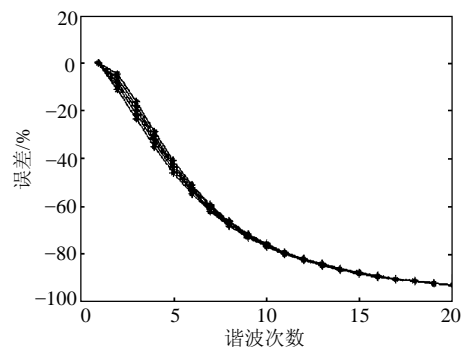


图 4 感应式有功电能表误差频率特性  
 Fig. 4 Error frequency characteristics of induction watt-hour meter

次数的升高, 误差频率特性曲线簇呈迅速下降趋势, 因此感应式有功电能表只能计量一部分的谐波, 它反映的电能值可表示为:

$$W = W_1 + \sum_{h=2}^n K_h W_h \quad (7)$$

式中:  $W$  为计量的总电能;  $W_1$  为基波电能;  $W_h$  为第  $h$  次谐波电能;  $K_h$  为谐波电能频率响应系数<sup>[10]</sup>。

显然,  $K_h < 1$ , 且谐波次数  $h$  越高,  $K_h$  的值越小。研究表明, 当谐波次数为 9 次时测量误差已衰减 80% 以上<sup>[12]</sup>。

### 3.2.2 全电子式电能表的误差频率特性

全电子式电能表原理框图如图 5 所示。

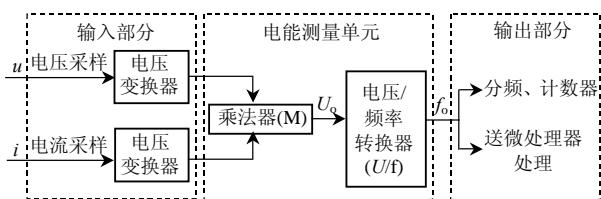


图 5 全电子式电能表

Fig. 5 Functional block diagram of full electronic watt-hour meter

它采用专用的电能表集成电路, 通过对用户电压和电流信号实时采样并处理后, 按有功功率定义作乘法运算得到与被测电能成正比的脉冲输出显示。所以从理论上讲, 电子表对谐波功率的响应是和对基波功率的响应相同的, 即

$$P = U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots + U_n I_n \cos \varphi_n = P_1 + \sum_{h=2}^n P_h \quad (8)$$

而平均功率等于基波功率和各次谐波功率的代数和。

由理论分析和实际测量可作出目前应用最广的时分割乘法器式电子电能表的频率特性曲线, 如图 6 所示<sup>[10]</sup>。为便于对比, 图 6 中也给出了感应式有功电能表频率特性曲线簇。

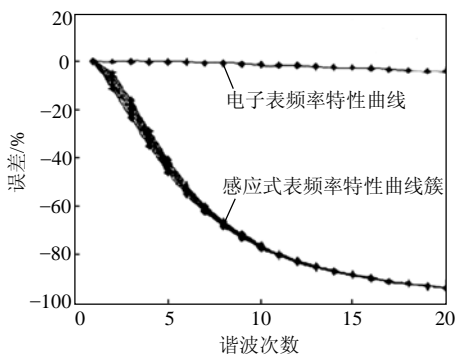


图 6 2 种电能表误差频率特性比较

Fig. 6 Comparison of error frequency characteristics of two kinds of watt-hour meters

由图 6 可见, 电子式有功电能表的频率特性曲线远较感应式有功电能表平坦, 呈宽带响应特性。

电子式电能表的带宽主要受其互感器频带和乘法器时钟频率限制, 存在一定差异, 误差主要源于其输入模块。在结构设计上, 由于电能表输入模块仅对基波信号进行变送, 当电压、电流波形发生畸变时, 磁通不能相应地发生线性变化而产生误差, 影响了电能表整体的计量精度。但绝大部分电子式电能表在 0~1kHz 范围内对谐波功率的响应和对基波功率的响应大致相同, 因此它基本上能计量基波电能和全部谐波电能, 反映的电能值可表示为

$$W = W_1 + \sum_{h=2}^n W_h \quad (9)$$

式中  $W$ 、 $W_1$ 、 $W_h$  和  $K_h$  的定义与式(7)相同。

### 3.2.3 电网中有功潮流对电能表计量结果的影响

值得注意的是, 除电能表本身频率特性之外, 谐波功率潮流也对计量结果有影响。图 7 为简化电网中的基波和谐波有功潮流示意图。

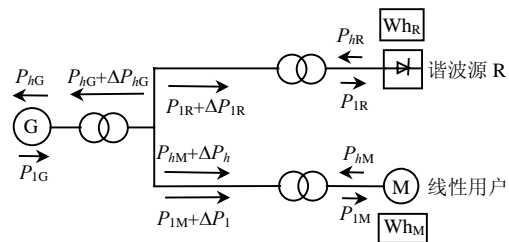


图 7 简化电网中的基波和谐波有功潮流

Fig. 7 Active fundamental and harmonic power flow in simplified power network

由图 7 可得基波有功功率平衡式和谐波有功功率平衡式:

$$P_{1G} = P_{1M} + P_{1R} + \Delta P_{1M} + \Delta P_{1R} \quad (10)$$

$$P_{hR} = P_{hG} + P_{hM} + \Delta P_{hG} + \Delta P_{hM} \quad (11)$$

式(10)和(11)中:  $P_{1G}$  为发电机供出的总有功功率;  $P_{1M}$  为线性负荷的有功功率;  $P_{1R}$  为非线性负荷的有功功率;  $\Delta P_{1M}$  为线性负荷产生的基波有功线损功率;  $\Delta P_{1R}$  为非线性负荷产生的基波有功线损功率;  $P_{hR}$  为谐波源供出的谐波有功功率;  $P_{hG}$  为流向发电机的谐波有功功率;  $P_{hM}$  为流向线性负荷的谐波有功功率;  $\Delta P_{hG}$  为流向发电机的谐波有功功率产生的谐波有功线损功率;  $\Delta P_{hM}$  为流向线性负荷的谐波有功功率产生的谐波有功线损功率。

图 7 中  $Wh_M$  和  $Wh_R$  分别表示装在线性用户 M 和非线性用户 R(谐波源)处的电能表, 由图 7 可知通过它们的实际有功功率分别为  $P_{1M} + P_{hM}$  和  $P_{1R} - P_{hR}$ 。

考虑前述的电表的频率特性，电表  $Wh_M$  反映的有功功率为  $K_{1M}P_{1M}+K_{hM}P_{hM}$ ；而电表  $Wh_R$  反映的有功功率为  $K_{1R}P_{1R}-K_{hR}P_{hR}$ 。

若两电表均采用感应式电表，则  $K_{1(M,R)}=1$ ， $K_{h(M,R)}<1$ ，因此电表  $Wh_M$  测得的有功电能读数为  $W_{1M}+\Sigma K_{hM}W_{hM}$ ，而电表  $Wh_R$  测得的有功电能读数为  $W_{1R}-\Sigma K_{hR}W_{hR}$ 。

若两电表均采用电子式电表，则  $K_{1(M,R)}=1$ ， $K_{h(M,R)}=1$ ，因此电表  $Wh_M$  测得的有功电能读数为  $W_{1M}+\Sigma W_{hM}$ ，而电表  $Wh_R$  测得的有功电能读数为  $W_{1R}-\Sigma W_{hR}$ 。

亦即对于线性电力用户  $M$ ，基波功率和谐波功率方向相同，因此感应式电表计量的电能是基波电能与部分谐波电能之和，电子式电表计量的电能是基波电能与全部谐波电能之和；对非线性电力用户  $R$ ，基波功率和谐波功率方向相反，因此感应式电表计量的电能是基波电能与部分谐波电能之差，电子式电表计量的电能是基波电能与全部谐波电能之差。

### 3.2.4 不同计量方式的计量结果及合理性分析

#### 3.2.4.1 全能量计量方式

这种方式要求电表准确反映基波电能和全部谐波电能，即对于线性用户，电表应能给出读数  $W_{1M}+\Sigma W_{hM}$ ，非线性用户电表则应能给出读数  $W_{1R}-\Sigma W_{hR}$ 。

实际情况是：线性用户采用感应式电表的计量结果为  $W_{1M}+\Sigma K_{hM}W_{hM}$ ，误差为  $\Delta=\Sigma K_{hM}W_{hM}-\Sigma W_{hM}<0$ ，少计入部分谐波电能；而采用电子式电表的计量结果近似为  $W_{1M}+\Sigma W_{hM}$ ，误差  $\Delta\approx 0$ ；而对谐波源(非线性用户)，感应式电表的计量结果为  $W_{1R}-\Sigma K_{hR}W_{hR}$ ，误差为  $\Delta=W_{hR}-\Sigma K_{hR}W_{hR}>0$ ，多计部分谐波电能，而电子式电表的计量结果近似为  $W_{1R}-\Sigma W_{hR}$ ，误差  $\Delta\approx 0$ 。

由上述可知，全能量计量方式下电子式电表基本无计量误差，为有功电表的理想选择。但这种计量方式本身的合理性值得怀疑，因为它将基波电能和谐波电能等价齐观，使得线性用户受谐波危害的同时又多交电费，非线性用户造成谐波污染却少交电费<sup>[13]</sup>，所以该方式仅适用于在过去电力系统谐波含量小、影响小的情况下使用。

#### 3.2.4.2 基波电能计量方式

这种方式只要求电表反映基波有功功率和有功电能而不计及谐波有功功率，即对于线性用户

和非线性用户，电表都只反映基波有功电能  $W_{1M}$  或  $W_{1R}$ 。

实际情况是：线性用户采用感应式电表的计量结果为  $W_{1M}+\Sigma W_{hM}$ ，误差为  $\Delta=\Sigma K_{hM}W_{hM}>0$ ，多计入部分谐波有功电能，而电子式电表的计量结果近似为  $W_{1M}+\Sigma W_{hM}$ ，误差为  $\Delta=\Sigma W_{hM}>0$ ，多计入了全部谐波有功电能；对于谐波源(非线性用户)，感应式电表的计量结果为  $W_{1R}-\Sigma K_{hR}W_{hR}$ ，误差为  $\Delta=-\Sigma K_{hR}W_{hR}<0$ ，而电子式电表的计量结果近似为  $W_{1R}-\Sigma W_{hR}$ ，误差为  $\Delta=-\Sigma W_{hR}<0$ ，且误差绝对值更大。

这两类电表均不能准确计量有功电能，它们的误差正负一致，对线性用户，电表表示值大于基波有功电能；对非线性用户，电表表示值又小于基波有功电能，这不利于电力部门和线性用户，且电子式电表的误差绝对值更大，所以要准确计量基波有功电能必须采用专门的基波有功电表。此外，这种计量方式虽然避免了线性用户承担额外的谐波有功电费，但非线性用户带来谐波污染却仅仅支付基波有功电费而未受到任何经济处罚，达不到通过经济手段迫使用户采取措施减少向电网注入谐波的目的，故此方式在目前电网谐波污染越来越严重的情况下也不合适。

#### 3.2.4.3 带加权系数的谐波有功电能计量方式

这是一种分别计量基波电能和谐波电能的改进型计量方式，计算公式如下：

$$W = C_1 W_1 - C_{\text{pos}} W_{\text{hpos}} + C_{\text{opp}} W_{\text{hopp}} \quad (12)$$

式中： $W_1$  为基波电能； $W_{\text{hpos}}$  为正向谐波电能； $W_{\text{hopp}}$  为反向谐波电能； $C_1$  为基波加权系数； $C_{\text{pos}}$ 、 $C_{\text{opp}}$  为正、反向谐波电能加权系数。建议取  $C_1=1$ ； $0<C_{\text{pos}}<1$ ； $C_{\text{opp}}>1$ <sup>[10]</sup>。

这种新型计量收费方式，可以对受谐波危害的线性用户进行一定补偿，对非线性用户发出的谐波电能进行合理处罚，达到通过经济手段减少电网谐波污染的目的，实现准确、公平计量，适用于谐波污染严重的系统<sup>[14-15]</sup>。

## 4 结论

1) 0.5 级及以上的电磁式电流互感器或电压互感器，对于频率在 2 kHz 以下的电流信号或频率在 1 kHz 以下的电压信号具有较好的频率特性，能满足电网中存在谐波时的计量要求。

2) 电容式 TV 幅频特性和角频特性都较差，不

适用于存在谐波时的电能计量。

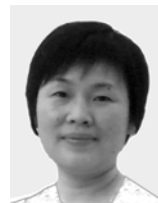
3) 感应型电能表具有迅速下降的误差频率特性,对3次及以上谐波的计量结果的负误差较大。

4) 电子式电能表具有宽频响应特性,在低于1 kHz的范围内(20次谐波)的计量误差受频率变化影响很小。

5) 计量方式的确定对谐波作用下有功计量结果的准确性、合理性至关重要。全能量计量方式和基波电能计量方式均不适用于谐波污染较重的情况。建议大中型电力用户和谐波污染较重的供电系统采用带加权系数的谐波电能计量方式。

## 参考文献

- [1] 李战鹰,李建华. ±800 kV 特高压直流输电系统特征谐波分析[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 10-13, 34.  
Li Zhanying, Li Jianhua. Analysis of characteristic harmonics in ±800 kV ultra high voltage direct current power transmission system[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 10-13, 34(in Chinese).
- [2] 李季, 罗隆福. 直流输电谐波不稳定抑制新方法[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(2): 6-9.  
Li Ji, Luo Longfu. Suppression of harmonic instability in HVDC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(2): 6-9(in Chinese).
- [3] 李建华, 王渊. 高压直流输电系统谐波计算软件包开发与应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(4): 96-99.  
Li Jianhua, Wang Yuan. Development and application of harmonic calculation software for HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(4): 96-99 (in Chinese).
- [4] 张诚, 廖勇, 孙才新. 三峡交直流混合输电系统谐波的仿真分析和计算[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(24): 47-49.  
Zhang Cheng, Liao Yong, Sun Caixin. Simulation and calculation of harmonic for Three Gorges AC and DC transmission system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(24): 47-49(in Chinese).
- [5] 赵贺, 林海雪. 电网中非线性负荷谐波功率方向的确定[J]. 电网技术, 2007, 31(17): 51-54.  
Zhao He, Lin Haixue. Determining harmonic power flow direction of nonlinear load in power network[J]. Power System Technology, 2007, 31(17): 51-54(in Chinese).
- [6] 吴竞昌. 供电系统谐波[M]. 北京: 水利电力出版社, 1998.
- [7] Watson N R. 电力系统谐波[M]. 林海雪, 等译. 2版. 北京: 中国电力出版社, 1988.
- [8] 任晓东, 陈树勇. 电子式电流互感器高压侧取能装置的设计[J]. 电网技术, 2008, 32(18): 67-71.  
Ren Xiaodong, Chen Shuyong. Design of a high side energy extracting device for active electronic current transformer[J]. Power System Technology, 2008, 32(18): 67-71(in Chinese).
- [9] 张蓬鹤, 邓泽官. 计量用互感器在线监测系统的研制[J]. 电测与仪表, 2009, 46(7): 41-44.  
Zhang Penghe, Deng Zeguan. The development of the metric transformer online monitoring system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2009, 46(7): 41-44(in Chinese).
- [10] 葛毅. 电力谐波对电能表电能计量的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.
- [11] Baghzouz Y, Owen T T. Harmonic analysis of induction watt-hour meter[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and System, 1985, PAS-104(2): 99-106.
- [12] 申邵东, 魏星. 谐波对有功电能计量影响的仿真研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(2): 54-56.  
Shen Shaodong, Wei Xing. Influence of harmonics on electric energy measurement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(2): 54-56(in Chinese).
- [13] 何群. 电力谐波对电能计量影响的研究[J]. 四川电力技术, 2009(1): 50-54.  
He Qun. Research on influence of harmonics on electric energy measurement[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2009(1): 50-54(in Chinese).
- [14] 梅永, 王柏林. 电力系统信号采集与谐波测量方法[J]. 电测与仪表, 2008, 45(9): 5-10.  
Mei Yong, Wang Bolin. Signal acquisition and measurement methods for harmonics in power systems[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2008, 45(9): 5-10(in Chinese).
- [15] 孙益辉, 符杨. 基于嵌入式 Linux 和 QT/Embedded 的电力谐波信号采集[J]. 电测与仪表, 2008, 45(11): 18-21.  
Sun Yihui, Fu Yang. Sampling power harmonics signals based on embedded Linux and QT/Embedded[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2008, 45(11): 18-21(in Chinese).



李斌勤

收稿日期: 2009-12-01。

作者简介:

李斌勤(1970—), 女, 重庆电力高等专科学校电工与电测教研室专职教师, 重庆大学电气学院在职硕士研究生, 长期从事电路与磁路、电工学、电能计量、数字化测量等课程的教学工作, E-mail: libinqincqn@qq.com;

陈伟根(1967—), 男, 重庆大学电气学院教授, 博士生导师, 主要从事变电设备在线监测、状态检修等的研究;

李刚(1967—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电能计量技术研究工作。

(编辑 杨天和)