

基于等值功率因数法的含谐波源支路的电能量计量方法研究

孙鸣, 张纬, 章书剑, 马娟

(合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 从理论上分析谐波源对电能计量的影响, 通过仿真实验加以验证。依据功率因数调整电费的办法, 提出了基于基波功率因数和等值功率因数相结合的电费计量方法。分别对系统侧、线性负荷侧和非线性负荷侧的电费计量进行了讨论, 得出对于非线性用户在计量基波电量的基础上, 应根据等值功率因数调整其电费的收取, 而对于系统和线性负荷用户, 则仍采用基波功率因数调整其电费的收取的结论。

关键词: 谐波; 电能计量; 非线性负荷; 快速傅里叶变换; 功率因数

The study of energy metering containing harmonic source branch based on equivalent power factor method

SUN Ming, ZHANG Wei, ZHANG Shu-jian, MA Juan

(School Electric Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The paper theoretically analyzes the influence of harmonic sources on electric energy metering, and validates them through simulation experiments. At the same time, according to the power factor approaches for tariff adjustment, it proposes the method of power measurement based on the combination of fundamental power factor and equivalent power factor. And it discusses respectively the power measurement methods on the system, linear load and nonlinear load. It is concluded that based on the fundamental power measurement, the tariff of the non-linear user should adjusted according to the equivalent power factor, and tariff for the system and linear load customers are still adjusted according to the fundamental power factor.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50877021).

Key words: harmonic; electric energy metering; nonlinear load; FFT; power factor

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)23-0182-04

0 引言

随着电力电子装置应用的迅速普及, 其非线性的负荷特性给电网带来丰富的谐波电流, 使得公用电网的谐波污染日趋严重, 由谐波引起的各种故障和事故也不断发生, 谐波亦增加了公用电网的附加损耗、降低了发电、输电及用电设备的效率, 同时谐波也对电能计量产生了不利影响。

由于非线性负荷将吸收的部分基波功率转换为谐波功率, 故在供电系统中又形成了基波潮流以外的谐波潮流^[1-2]。该谐波潮流由非线性负荷端流向系统和线性负荷侧。由此, 若采用传统的电度表来计量电能其结果是非线性负荷由于发出谐波而减少了用电量, 线性负荷由于吸收谐波而增加了用电量^[3-6]。基于此, 目前已有采用数字式电度表计量基波电量。

但是谐波给电力网带来的危害还是存在的, 由此产生的后果应该由谐波源来承担, 故文献[8-9]提出增收附加电费的方法, 附加电费为检测出的谐波电能乘以系数单价, 但系数单价很难权威而合理的去定量。因此, 本文提出通过检测等值功率因数并利用已有的《功率因数调整电费的办法》^[9]来征收附加电费的方法, 从而达到抑制谐波的目的。

1 谐波对电力网电能计量影响的分析

1.1 谐波对电能计量影响的理论分析

基于文献[2]对基波潮流和谐波潮流的分析, 建一含线性负荷和非线性负荷的模型如图1。

以PCC点处为分界, 可见, 电源发出基波有功 P_{S1} , 一部分 P_{L1} 传送给线性负荷, 一部分 P_{NL1} 传给非线性负荷。而整流电路将 P_{NL1} 中的一部分转换成谐波功率 P_{NLk} , 返送给系统和线性负荷, 分别为

P_{Sk} 和 P_{Lk} 。

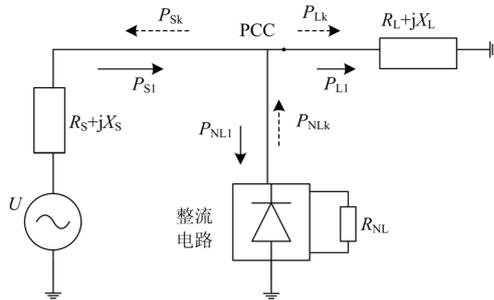


图1 含线性负荷和非线性负荷的模型

Fig.1 Model with linear and nonlinear load

无论线性负荷和非线性负荷，它们所消耗的是系统提供的基波有功功率。从图1中可以看到，系统和非线性负荷的基波功率与谐波功率潮流的方向相反，而线性负荷则相同。

若感应式电能表计量的读数为 P_G ，数字式电能表显示的读数为 P_D （积分功率），那么：

$$P_D = P_1 + \sum_{k=2} P_k, \quad P_G = P_1 + C \sum_{k=2} P_k \quad (1)$$

式中，系数 $C < 1$ ，表明感应式电能表只计量部分谐波电能。

对于线性负荷，其中 $P_1 > 0$ ， $\sum_{k=2} P_k > 0$ ，方向相同，都是被线性负荷吸收的功率，有 $P_D > P_G > P_1$ ；

对非线性负荷，其中 $\sum_{k=2} P_k < 0$ ，与 P_1 方向相反，

是向电网反向回馈的谐波电能，有 $P_D < P_G < P_1$ 。

由此可见，线性负荷由于被迫吸收谐波功率多交电费，而发出谐波的非线性负荷却因此而少交电费。

1.2 谐波对电能计量影响的仿真分析

以单相桥式整流电路为例，基于图1在 Matlab 中搭建仿真实验图，实验电路中的电源发出的电压为理想的正弦波形，不产生谐波， $U_{SN} = 230 \text{ V}$ ，频率 $f = 50 \text{ Hz}$ 。电源侧等效阻抗 $R_s = 0.15 \Omega$ ， $L_s = 3.0856 \times 10^{-4} \text{ H}$ ；线性负荷为 RL 负载， $R_L = 5 \Omega$ ， $L_L = 0.0077 \text{ H}$ ；非线性负荷为四脉冲整流桥，可控器件触发延迟角 $\alpha = 60^\circ$ ，整流桥直流侧为阻感负载， $R_{NL} = 2.5 \Omega$ ， $L_2 = 1 \text{ H}$ 。在谐波源出口处（整流桥输入端）并联接入串有电抗器的无功补偿电容器支路， $C = 2.87 \times 10^{-4} \text{ F}$ ， $L = 0.003925 \text{ H}$ 。采样间隔时间设置为 0.002 s 。将仿真得出的数据 U 、 I_s 、 I_1 、 I_2 保存成.txt 格式，并存储在 Matlab 的 work 里面，同时在 Matlab 的 command window 中编程，对存储成.txt 格式的电压电流数据进行傅里叶变换，可以得到电压、电流的频谱图和相位图。利用 save 函数将频谱图和相位图保存成数据格式，即可得到各次谐波的幅值及相角值。表1、表2和表3分别列出了系统侧、线性负荷侧和非线性负荷侧的各次谐波电压电流有效值及功率因数以及根据式 $P = \sum_{k=1} U_{kN} I_{kN} \cos \varphi_n$ 计算出积分有功功率。

表1 系统侧的仿真计算结果

Tab.1 Simulation and calculation results of system

谐波次数	PCC 点处电压有效值/V	电压相角/(弧度)	系统侧电流有效值/A	电流相角/(弧度)	$\cos \varphi_n$	各次谐波有功值/W
1	215.309 8	-1.524 9	58.572 12	-1.950 3	0.910 874	11 487.17
3	5.029 81	0.110 56	0.709 969	2.834 7	-0.914 12	-3.264 35
5	7.850 528	-1.984 4	5.865 767	-0.153 69	-0.257	-11.834 6
7	7.885 878	2.314 7	4.284 208	-2.128 4	-0.266 05	-8.988 3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
各次谐波有功值之和得出的积分有功功率 P_s						11 331.02

表2 线性负荷侧的仿真计算结果

Tab.2 Simulation and calculation results of linear load

谐波次数	PCC 点处电压有效值/V	电压相角/(弧度)	线性负荷侧电流有效值/A	电流相角/(弧度)	$\cos \varphi_n$	各次谐波有功值/W
1	215.309 8	-1.524 9	39.524 84	-1.964 9	0.904 752	7 699.512
3	5.029 81	0.110 56	0.028 643	-0.224 91	0.944 256	0.136 04
5	7.850 528	-1.984 4	0.228 962	3.082 1	0.346 757	0.623 285
7	7.885 878	2.314 7	0.169 913	1.084 4	0.333 955	0.447 471
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
各次谐波有功值之和得出的积分有功功率 P_L						7 706.269

表3 非线性负荷侧的仿真计算结果

Tab.3 Simulation and calculation results of nonlinear load

谐波次数	PCC 点处电压有效值/V	电压相角/(弧度)	非线性负荷侧电流有效值/A	电流相角/(弧度)	$\cos\varphi_h$	各次谐波有功值/W
1	215.309 8	-1.524 9	19.060 01	-1.919 9	0.922 997	3 787.8
3	5.029 81	0.110 56	0.738 391	2.837 8	-0.915 38	-3.399 68
5	7.850 528	-1.984 4	6.093 774	-0.150 16	-0.260 41	-12.457 7
7	7.885 878	2.314 7	4.453 747	-2.125 7	-0.268 65	-9.435 37
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
各次谐波有功值之和得出的积分有功功率 P_{NL}						3 624.895

由表 1、表 2 可知:

线性侧: $P_{L1}=7\ 699.512\ \text{W}$, $P_L=7\ 706.269\ \text{W}$,

所以 $P_L > P_{L1}$;

非线性侧: $P_{NL1}=3\ 787.8\ \text{W}$, $P_{NL}=3\ 624.895\ \text{W}$,

所以 $P_{NL} < P_{NL1}$;

系统侧: $P_{L1}=11\ 487.17\ \text{W}$, $P_L=11\ 331.02\ \text{W}$,

所以 $P_S < P_{S1}$ 。

以上的仿真表明采用基波电表收取基本电费是合理的。但是谐波源发出的谐波使公用电网中的元件产生附加损耗、影响各种电气设备的正常工作, 理应对它进行额外的惩罚性计费。

2 功率因数调整电费的电能计量方法

2.1 功率因数的定义

通常意义上的功率因数指的是基波功率因数, 它用以反映用电设备占用基波无功功率的程度。

基波功率因数的定义:

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad (2)$$

因此, 供电公司在考核用户的功率因数时大多计量基波功率因数。当含有谐波源支路时, 此计量方法无法反映因谐波而产生的虚功分量^[10], 故文献[1,11]提出含谐波的功率因数的计量方法如式(3):

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{U_1 I_1 \cos\varphi_1 + \dots + U_n I_n \cos\varphi_n}{UI} \quad (3)$$

记为等值功率因数。这里 U_n 、 I_n ($n \geq 2$) 为高次谐波电压、电流含量, 显然等值功率因数能反映电力网中谐波的含量。

2.2 功率因数调整电费的讨论

2.2.1 系统侧和线性负荷侧的功率因数

a. 系统侧

从表 1 中可得基波功率因数: $\cos\varphi_{S1}=0.910\ 874$

电压有效值: $U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + \dots + U_n^2} = 218.685\ \text{V}$

电流有效值: $I_S = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + \dots + I_n^2} = 59.44\ \text{A}$

计算等值功率因数:

$$\cos\varphi_S = \frac{P}{UI_S} = \frac{11331.02}{218.685 \times 59.44} = 0.8717$$

b. 线性负荷侧

从表 2 中可得基波功率因数: $\cos\varphi_{L1}=0.904\ 752$

电压有效值: $U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + \dots + U_n^2} = 218.685\ \text{V}$

电流有效值: $I_L = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + \dots + I_n^2} = 39.527\ \text{A}$

计算等值功率因数:

$$\cos\varphi_L = \frac{P}{UI_L} = \frac{7706.269}{218.685 \times 39.527} = 0.8915$$

可以看出, 系统和线性负荷的等值功率因数都比基波功率因数略小, 所以计量它们的功率因数时, 应采用基波功率因数。

2.2.2 非线性负荷侧的功率因数

在未加电容器补偿时, 本文同样做了一个仿真, 不再列表赘述。它的基波功率因数:

$\cos\varphi_{NL1}=0.501\ 729$, 等值功率因数: $\cos\varphi_{NL}=0.427$ 。

加了电容器补偿后, 从表 3 中可得基波功率因数: $\cos\varphi_{NL1}=0.922\ 997$ 。

电压有效值: $U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + \dots + U_n^2} = 218.685\ \text{V}$

电流有效值: $I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + \dots + I_n^2} = 21.77\ \text{A}$

计算等值功率因数:

$$\cos\varphi_{NL} = \frac{P}{UI} = \frac{3624.895}{218.685 \times 21.77} = 0.76$$

2.2.3 非线性负荷侧附加电费的计量方法

由上节的分析可见, 非线性负荷通过并联电容器可以将基波功率因数由 0.501 729 提高到 0.922 997, 将等值功率因数由 0.427 提高到 0.76, 等值功率因数之所以增长较多, 原因在于仿真时在谐波源出口处的并联电容器支路串联了占电容器容抗 12% 的电抗器, 其大大削弱了三次谐波的输出。如果供电公司以检测到的基波功率因数为标准, 根据《功率因数电费调整办法》中的调整表, 以 0.9 为标准值, 非线性用户的月电费要少缴 0.30%。若以

检测到的等值功率因数为准, 则非线性用户月电费要多缴7.0%, 相差7.3%。显然对非线性用户在计量基波电量的基础上, 根据等值功率因数调整其电费的收取能起到一定的惩罚作用。

对于谐波量超出国家标准的谐波源支路, 仅比照《功率因数电费调整办法》收取电费的惩罚力度尚可能不足以促使其及时治理谐波。由本文的分析和仿真可知谐波源发出的谐波量越大其等值功率因数越低, 因此有必要在计量其基波电量的基础上, 根据求得的等值功率因数比对功率因数电费调整表, 在应多缴的比例(如本文中的7.0%)基础上再乘以大于1的比例系数, 从而促使其必须治理谐波。

3 结论

本文分析并讨论了配电网含谐波源支路时对电能计量会产生哪些影响以及相应的解决措施, 得出如下结论:

(1) 系统侧、线性负荷侧及非线性负荷侧均宜采用基波电能表计量所消耗的电能;

(2) 线性负荷支路的积分有功功率大于基波有功功率, 非线性负荷支路的积分有功功率小于基波有功功率;

(3) 谐波源发出的谐波量越大其等值功率因数越低;

(4) 对非线性用户在计量基波电量的基础上, 应根据等值功率因数调整其电费的收取, 而对于系统和线性负荷用户, 则仍采用基波功率因数调整其电费的收取。对于谐波量超出国家标准的谐波源支路, 在应多缴的比例基础上再乘以大于1的比例系数, 从而促使其必须治理谐波。

参考文献

- [1] 王兆安, 杨君, 等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [2] 吴竟昌. 电力系统谐波[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [3] 同向前, 薛钧义. 考虑谐波污染时用户电量的计量[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(22): 53-55.
- TONG Xiang-qian, XUE Jun-yi. Consumer electric energy measurement in consideration of harmonic pollution[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(22): 53-55.

- [4] Domijan A, Embriz-Santander E, Gilani A. Watt-hour meter accuracy under controlled unbalanced harmonic voltage and current conditions[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(1): 64-70.
- [5] 赵建国. 电能计量中的谐波分析[J]. 中国电力, 1997, 30(12): 21-24.
- ZHAO Jian-guo. Harmonics analysis in energy measurement[J]. Electric Power, 1997, 30(12): 21-24.
- [6] 严伟嘉, 等. 谐波对电能计量影响的研究[J]. 华东电力, 2006, 34(2).
- YAN Wei-jia, et al. Effects of harmonics on electric energy metering[J]. East China Electric Power, 2006, 34(2).
- [7] 陈庆祺. 电力谐波对电能计量影响的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2005.
- [8] 李长宇. 谐波对电能计量影响的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
- [9] 功率因数调整电费的办法. 2009-6-25 [EB/OL]. <http://blog.163.com/dyx0520@126/blog/static/84986202007725895957>.
- [10] 钱伟, 程肇基, 等. 电力系统中非正弦波功率体系的研究[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(1): 11-15.
- QIAN Wei, CHENG Zhao-ji, et al. Research on nonsinusoidal power system in electric power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(1): 11-15.
- [11] 刘学会, 等. 非正弦电流电网的功率因数及其测量[J]. 电测与仪表, 2004, 41(457): 23-25.
- LIU Xue-hui, et al. The power factor and its measurement of non-sinusoidal AC electric network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2004, 41(457): 23-25.

收稿日期: 2009-12-02; 修回日期: 2010-01-17

作者简介:

孙鸣(1957-), 男, 教授, 主要研究方向为电力系统继电保护及调度自动化、用户电力技术等; E-mail: hfsunming@sina.com

张纬(1986-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为谐波电能计量;

章书剑(1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为分布式发电。