

# 基于 RTDS 的谐波对电能计量影响的仿真分析

李长宇, 舒乃秋, 彭辉, 李玲

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 通过理论分析, 表明谐波功率大小和方向是造成谐波对电能计量影响的两个因素。并分两种工况在实时数字仿真系统(RTDS)上进行了仿真实验, 仿真结果验证了理论分析的正确性, 为准确计量电能提供了理论依据。

**关键词:** 谐波; 电能计量; RTDS; 仿真

**中图分类号:** TM933 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)16-0025-03

## 0 引言

近年来, 随着电力电子技术的快速发展, 各种电力电子设备得到了广泛应用。由于电力电子器件的非线性, 导致电力系统产生大量的谐波。此外, 电气设备铁芯的饱和, 电弧炼钢炉的大量使用, 也会向电力系统注入大量的谐波。这就造成了电力系统电压、电流波形的畸变。在某些地点, 例如使用大量电弧炉的冶金企业, 波形畸变相当严重。谐波污染对系统中使用的各种仪器设备所产生的不利影响已经不容忽视。

本文主要针对谐波对电能计量的影响, 即谐波功率的大小和方向对电能计量的影响, 进行了理论分析和仿真研究。

## 1 谐波对电能计量影响的理论分析

图 1 为一含有非线性负载和线性负载的简单系统等效电路, 图中  $u_s(t)$  是电压源,  $u(t)$  是公共连接点 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。

下面就电源电压波形畸变(含有谐波)和无畸变两种情形, 研究电能计量所受到的影响。

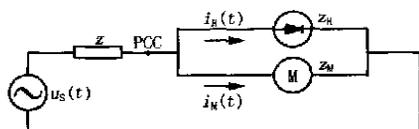


图 1 含有线性负载和非线性负载的简单电力系统等效电路图

Fig. 1 Simple equivalent circuit containing linear load and non-linear load

### 1.1 电源电压波形畸变时的理论分析

#### 1.1.1 电压电流表达式

设电源电压中含有的最高次谐波次数为  $M$ , 则电压  $u(t)$  为:

$$u(t) = \sqrt{2} U_1 \cos(\omega t + \phi_{u1}) + \sum_{h=2}^M \sqrt{2} U_{Sh} \cos(h\omega t + \phi_{uSh}) + \sum_{h=2}^N \sqrt{2} U_{Hh} \cos(h\omega t + \phi_{uHh}) \quad (1)$$

式中:  $N$  为非线性负载发出的谐波电流的最高次谐波次数;  $U_{Sh}$ 、 $U_{Hh}$  为由于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;  $\phi_{uSh}$ 、 $\phi_{uHh}$  为两个谐波源在 PCC 点  $h$  次谐波电压的初相角;  $\phi_{u1}$  为 PCC 点的电压基波分量的初相角。

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:

$$i_H(t) = \sqrt{2} I_{H1} \cos(\omega t + \phi_{iH1}) + \sum_{h=2}^M \sqrt{2} I_{ShH} \cos(h\omega t + \phi_{iShH}) - \sum_{h=2}^N \sqrt{2} I_{HhH} \cos(h\omega t + \phi_{iHhH}) \quad (2)$$

$$i_M(t) = \sqrt{2} I_{M1} \cos(\omega t + \phi_{iM1}) + \sum_{h=2}^M \sqrt{2} I_{ShM} \cos(h\omega t + \phi_{iShM}) + \sum_{h=2}^N \sqrt{2} I_{HhM} \cos(h\omega t + \phi_{iHhM}) \quad (3)$$

式中:  $I_{ShH}$ 、 $I_{ShM}$  为非线性负载和线性负载从系统中吸收的  $h$  次谐波电流有效值,  $\phi_{iShH}$ 、 $\phi_{iShM}$  分别是其初相角;  $I_{HhH}$ 、 $\phi_{iHhH}$  为非线性负载发出的  $h$  次谐波电流有效值和初相角, 有效值前的负号表示电流实际方向与参考方向相反;  $I_{HhM}$ 、 $\phi_{iHhM}$  为线性负载吸收的由非线性负载发出的  $h$  次谐波电流有效值和初相角;  $\phi_{iH1}$ 、 $\phi_{iM1}$  为非线性负载和线性负载的基波电流初相角。

#### 1.1.2 两种负载消耗的电能

非线性负载  $Z_H$  吸收的有功功率  $P_H$  为:

$$P_H = \frac{1}{T} \int_0^T P_H(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i_H(t) dt \quad (4)$$

将式(1)和式(2)代入式(4),并根据三角函数的正交性,整理得:

$$P_H = U_1 I_{1H} \cos \phi_{1H} + \sum_{h=2}^M U_{Sh} I_{Sh} \cos \phi_{ShH} - \sum_{h=2}^N U_{Hh} I_{Hh} \cos \phi_{Hh} = P_{H1} + P_{Hb} - P_{Hh} \quad (5)$$

式中:  $P_{H1}$ 、 $P_{Hb}$ 分别为非线性负载吸收的基波和背景谐波有功功率<sup>[1]</sup>;  $P_{Hh}$ 为非线性负载发出的谐波有功功率,负号表示负载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  $E_H$ 为:

$$E_H = \int_0^T P_H dt = \int_0^T (P_{H1} + P_{Hb} - P_{Hh}) dt = E_{H1} + E_{Hb} - E_{Hh} \quad (6)$$

同理,可求出线性负载 M 在一个周期内消耗的电能  $E_M$ 为:

$$E_M = \int_0^T P_M dt = \int_0^T (P_{M1} + P_{MS_h} + P_{MH_h}) dt = E_{M1} + E_{MS_h} + E_{MH_h} \quad (7)$$

式中:  $E_{M1}$ 表示线性负载吸收的基波电能;  $E_{MS_h}$ 、 $E_{MH_h}$ 为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。

### 1.2 电源电压波形无畸变时理论分析

电源电压为工频正弦波时,式(1)~(3)右边不含中间项,而其它两项不变,与上一节相仿,可以求得两种负载在一个周期内消耗的电能:

$$E_H = \int_0^T P_H dt = \int_0^T (P_{H1} - P_{Hh}) dt = E_{H1} - E_{Hh} \quad (8)$$

$$E_M = \int_0^T P_M dt = \int_0^T (P_{M1} + P_{MH_h}) dt = E_{M1} + E_{MH_h} \quad (9)$$

### 1.3 电能计量影响的分析

综合上述理论分析可知,当电源电压波形畸变时,非线性负载吸收电源提供的基波和背景谐波两部分电能,同时将一部分基波电能转化成谐波有功电能注入电力系统;线性负载除了吸收电源提供的基波和谐波电能外,还要吸收由非线性负载发出的谐波电能。当电源电压为工频正弦波时,电源不向负载提供谐波电能。

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,只要系统中电压和电流含有谐波,线性负载实际消耗的电能就大于其吸收的基波电能。而在一般情况下,非线性负

载实际消耗的电能却要小于其吸收的基波电能<sup>[2]</sup>。这一结果导致用户实际消耗电能量与电能表读数不等。如果按电能表读数交费就会使非线性负载向系统注入谐波功率反而少交电费,而线性负载受到谐波污染却要多交电费。

## 2 谐波对电能计量影响的仿真实例及分析

### 2.1 RTDS 简介

RTDS(Real Time Digital Simulation)是专门用来对电磁暂态过程进行实时仿真的计算机系统<sup>[3]</sup>。RTDS的元件库中含有多种电源,这些电源既可作为正弦工频电源又可作为谐波源。当用作谐波源时其所含谐波的次数最高可达十次,并且各次谐波含量和初相角可由用户确定。当这些谐波源发出的谐波功率作为某个非线性负载的背景谐波功率时,可改变电源中谐波含量,研究非线性负载在各次谐波频率上吸收和发出谐波功率的变化情况。RTDS的元件库中还含有专门用来生成谐波电流的谐波发生器(Harmonic Injection),能够输出含有等幅的任意多次谐波的电流波形。

### 2.2 仿真实例

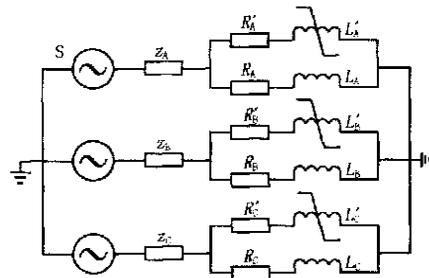


图2 三相电路仿真原理图

Fig. 2 Simulation diagram of three-phase circuit

表1 背景谐波中各次谐波电压含有率允许值和实验值  
Tab. 1 Permission and experiment HRUh in background harmonic

|         | 谐波次数 |     |     |     |     |     |     |     |
|---------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|         | 2    | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   |
| 允许值/(%) | 1.6  | 3.2 | 1.6 | 3.2 | 1.6 | 3.2 | 1.6 | 3.2 |
| 实验值/(%) | 1.4  | 9   | 1   | 7.5 | 0.8 | 5.2 | 0.2 | 3.2 |

图2为仿真实例的三相电路原理图,图中电源内阻和线路阻抗  $Z_A = Z_B = Z_C = 0.05 + j1.6$ ,线性电阻  $R$  和非线性电感  $L$  组成非线性负载,线性电阻  $R$  和线性电感  $L$  代表线性负载。具体数值  $R_A = R_B = R_C = 10$ ,  $R'_A = R'_B = R'_C = 200$ ,  $L_A = L_B = L_C = 0.2$  H,非线性电感  $L'_A = L'_B = L'_C$  其中的线性部分取为0.1 H。工况一下电源 S 为工频正弦电压源,

表 2 两种工况下三相负载吸收的基波和各次谐波功率

Tab.2 Fundamental and harmonic power values absorbed by three-phase loads under two conditions

| 负载  | 工况  | 基波    | 谐波次数  |        |       |        |        |         |        |          |
|-----|-----|-------|-------|--------|-------|--------|--------|---------|--------|----------|
|     |     |       | 2     | 3      | 4     | 5      | 6      | 7       | 8      | 9        |
| 非线性 | 工况一 | 342.1 | 0     | - 7.76 | 0     | - 0.2  | 0      | - 0.019 | 0      | - 0.0032 |
|     | 工况二 | 343.3 | 0.063 | - 1.68 | 0.008 | - 0.15 | 0.0058 | 0.011   | 0.0001 | 0        |
| 线性  | 工况一 | 483.5 | 0     | 0.059  | 0     | 0.0015 | 0      | 0.00014 | 0      | 0        |
|     | 工况二 | 484.6 | 0.075 | 2.35   | 0.02  | 0.87   | 0.0076 | 0.24    | 0.0003 | 0.061    |

其电压值  $u(t) = 6\sqrt{2}\cos t$  kV; 工况二下电压源波形畸变,即存在了背景谐波,根据国标 GB/T 14549-93 规定,并假定奇数次谐波电压含有率超标,其具体数值如表 1 所示;表 2 列出了两种工况下,三相非线性负载和线性负载吸收的基波和各次谐波功率。

### 2.3 仿真结果分析

由仿真结果可知,当电源电压波形无畸变时非线性电感(非线性负载)作为系统中唯一的谐波源在基数次谐波频率上向系统中注入谐波功率,并被系统和线性负载所吸收。

当电源电压波形畸变时,由于存在背景谐波,对于非线性负载来说,谐波功率的大小和方向发生了变化。仿真(非线性负载)时,改变谐波源中各次谐波的含量,非线性负载在各次谐波频率上的功率大小和方向也随之改变(仿真结果略)。电源电压波形有畸变时,非线性负载究竟是发出还是吸收谐波电能,取决于背景谐波电能与非线性负载发出的谐波电能的大小,式(6)中  $E_{Hb} - E_{Hh}$  的符号,即背景谐波电能小于非线性负载发出的谐波电能( $E_{Hb} - E_{Hh} < 0$ )时,非线性负载作为谐波源发出谐波;反之,背景谐波电能大于非线性负载发出的谐波电能( $E_{Hb} - E_{Hh} > 0$ )时,非线性负载作为负载吸收谐波。对线性负载而言,两种工况下均吸收谐波功率,与理论分析相符。

### 3 结论

本文结合含有非线性负载和线性负载的简单系统,从理论上分析研究了有无背景谐波两种工况下影响电能计量的两个因素,即谐波大小和方向。在

理论研究的基础上,利用实时数字仿真系统(RTDS)进行了仿真实验,仿真结果验证了理论分析的正确性。这一研究对如何减少谐波对电能计量的影响,提高电能计量的准确度有较高的参考价值。

此外,实时数字仿真系统(RTDS)作为系统的一种仿真手段,可灵活地实时模拟系统中实际波形,这不仅为研究谐波对电能计量的影响,也为进一步开展谐波治理方面的研究提供了有效的工具。

### 参考文献:

- [1] 同向前,薛钧义(TONG Xiang-qian, XUE Jun-yi). 考虑谐波污染时用户电量的计量(Consumer Electric Energy Measurement in Consideration of Harmonic Pollution) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(22): 53-55.
- [2] 吴竞昌(WU Jing-chang). 供电系统谐波(Power System Harmonics) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press), 1996.
- [3] 梁志成,马献东,等(LIANG Zhi-cheng, MA Xian-dong, et al). 实时数字仿真器 RTDS 及其应用(Real Time Digital Simulator(RTDS) and Its Applications) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1997, 21(10): 61-64.

收稿日期: 2003-11-23

作者简介:

李长宇(1978-),女,硕士研究生,研究方向为电能质量及电气设备在线监测技术;E-mail: lcy0609395@sohu.com

舒乃秋(1954-),男,教授,主要从事电力系统在线检测方面的研究。

### Simulation analysis of electric energy measurement influenced by harmonics based on RTDS

LI Chang-yu, SHU Nai-qiu, PENG Hui, LI Ling

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** It is indicated that measuring accuracy of electric energy is influenced by the harmonic power values and their direction through theoretical analysis in this paper. Simulation experiments are performed with the help of Real Time Digital Simulator (RTDS) under two conditions, it is shown that the theoretical analysis is accorded with simulation results, which provides a theory basis for accurately measuring electric energy.

**Key words:** harmonic; electric energy measurement; RTDS; simulation