

电力系统非线性负荷谐波源的仿真分析

孙荣富,刁婷婷,舒乃秋,李长宇

(武汉大学电气工程学院,湖北 武汉 430072)

摘要: 从理论上推导出电力系统中的非线性负荷在吸收系统基波功率的同时向系统发出谐波,从而成为系统的谐波源。并从功率方向着手,根据非线性负荷的不同作用机理建立不同的仿真模型分别验证了两种不同类型的非线性负荷谐波功率流向。实验结果表明,非线性负荷使系统电压、电流发生畸变,向系统发出谐波功率,从而验证了理论分析的正确性。

关键词: 非线性负荷; 谐波源; 实时数字仿真系统

中图分类号: TM743 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)04-0045-04

0 引言

随着整流器、变频调速装置、电弧炉、荧光灯以及各种电力电子装置等非线性负荷的大量应用,电网中电压、电流波形往往偏离正弦波形而发生畸变,不仅对电力系统的安全和经济运行以及用户端产生很大的危害,而且给电量的准确计量带来很大的不便。

本文从线性负载和非线性负载的特点出发,分析谐波负功率产生的原因:线性负载同时吸收基波、谐波功率;非线性负载在吸收基波功率的同时,将其中一部分基波功率转化为谐波功率注入系统,成为系统的谐波源。将非线性负荷从工作原理上分为两种:换流器负荷、非线性伏安特性负荷,并从功率方向着手,通过建立不同的仿真模型分别验证了两种不同类型的非线性负荷谐波功率流向。

1 谐波负功率产生原因

采用图1所示的电力系统等值电路,电源为工频正弦电压源 $u(t)$; Z_s 、 Z_1 、 Z_L 分别为电源内阻抗、线路等值阻抗和线性负荷等值阻抗; Z_{NL} 为非线性负荷。

$$A(t) = A_1(t) + \sum_{h=2} A_h(t) \quad (1)$$

(A 分别代表了 i 、 i_L 、 i_{NL} 、 u_{NL})

从而根据正交性原理可知:

电源发出功率

$$P_s = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i_1(t) dt = P_{s1} \quad (2)$$

电源内阻及线路吸收功率

$$P_{loss} = \frac{1}{T} \int_0^T (R_s + R_1) \cdot i^2(t) dt =$$

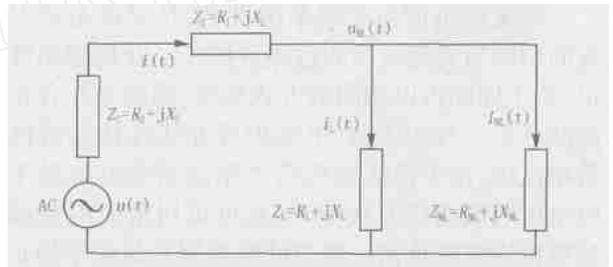


图1 含线性及非线性负荷的等值电路

Fig. 1 Equivalent circuit with linear and non-linear loads

$$P_{loss1} + \sum_{h=2} P_{lossh} \quad (3)$$

其中:

$$P_{loss1} = \frac{1}{T} \int_0^T (R_s + R_1) \cdot i_1^2(t) dt > 0 \quad (4)$$

$$P_{lossh} = \frac{1}{T} \int_0^T (R_s + R_1) \cdot i_h^2(t) dt > 0 \quad (5)$$

同理,线性负荷吸收功率:

$$P_{L1} = \frac{1}{T} \int_0^T R_L \cdot i_{L1}^2(t) dt > 0 \quad (6)$$

$$P_{Lh} = \frac{1}{T} \int_0^T R_L \cdot i_{Lh}^2(t) dt > 0 \quad (7)$$

非线性负荷吸收功率:

$$P_{NL} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{NL}(t) \cdot i_{NL}(t) dt = P_{NL1} + \sum_{h=2} P_{NLh} \quad (8)$$

对于基波功率: $P_{s1} = P_{loss1} + P_{L1} + P_{NL1}$

对于谐波功率: $0 = P_{lossh} + P_{Lh} + P_{NLh}$

从而:

$$P_{NLh} = - (P_{lossh} + P_{Lh}) < 0 \quad (9)$$

结论:非线性负荷消耗的谐波功率是负值,即作

为一个谐波源向电网回馈谐波电能,这部分电能是非线性负荷从电网吸收的基波电能的一部分转化而来。对于常见的电子式电能表所显示的读数 P

线性用户:

$$P_{L-1} < P < P_L \quad (10)$$

非线性用户:

$$P < P_{NL} < P_{NL-1} \quad (11)$$

2 实验仿真

非线性负荷根据对供电电压畸变程度的相关性分为换流器负荷、非线性伏安特性负荷,分别以六脉冲整流电路和电弧炉为例进行这两种负荷的仿真实验。

1) RTDS 中六脉冲整流电路仿真实验

换流器负荷由交流系统供电,且交流系统中设备的切换与交流电压的过零点同步。在理想条件下正、负半周期内以相同的方式触发,因此只存在奇次谐波分量。与变压器、电弧炉等非线性伏安特性负荷相比较,由于换流器负荷产生的谐波电流对于供电电压的畸变较不敏感,因此可以用谐波电流源模型模拟换流器负荷。典型的换流器负荷包括静止无功补偿器(SVC)、整流器以及整流装置。

RTDS(Real Time Digital Simulation)是由加拿大蒙尼托巴 HVDC 研究中心开发,RTDS 公司制造的实时全数字化暂态模拟装置,主要功能是对电力系统电磁暂态过程进行实时仿真^[1]。

在 PSCAD 界面中搭建实验电路,将三相电压和三相电流 6 个信号量的计算结果从 RTDS 的模拟量输出端子输出到放大器,信号放大后输入电能表。在图 2 所示的仿真实验模型中,三相正弦电压源 S 经变压器带六脉冲整流电路。同时有一阻抗为 $z = 10.0 + j4.84$ 的三相线性负载与整流电路并联。实验模型的电压等级为 10.0 kV,电压源 $U_S = 8.16 \sin t$,电源内阻为 0.5,变压器变比为 10.0 kV/10.0 kV,整流阀输出电流经过 0.1 H 的平波电感,带 10.0 电阻的

直流负载。当对于电路中非线性负载没有背景谐波时,进行两个实验:

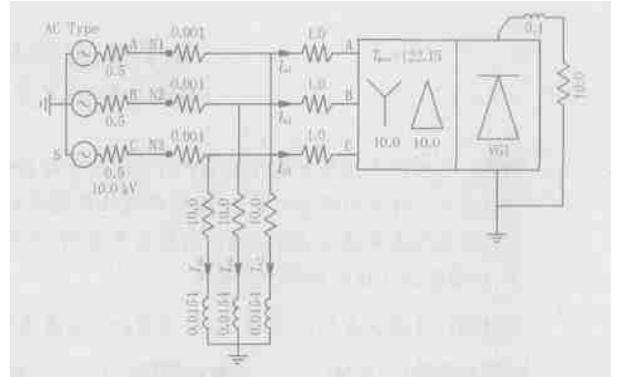


图 2 RTDS 仿真实验模型

Fig. 2 RTDS simulating experiment model

实验 1:实验电路图和整流器的控制系统分别如图 2 和图 3 所示。

实验 2:改变实验 1 中整流器的触发角,由原来的 $\alpha = 15^\circ$ 改为 $\alpha = 45^\circ$ 。

整流电路交流侧谐波电流的幅值和初相角都将随着触发角 α 的变化而变化^[2],所以实验 2 中改变取值,得到不同于实验 1 的谐波情况。

当存在背景谐波时,将图 2 实验电路图中正弦电压源改成含 3 次的谐波电压源。

实验 3:正弦电压源改成谐波源,电源中 3 次谐波含量取 3%,整流器触发角 $\alpha = 15^\circ$ 。

在 RTDS 的 Multiplot 中将所有三相电压电流进行傅里叶变换,求出其中的各次谐波含量和各次谐波电能,如表 1 所示。因实验中所用的整流电路是六脉冲整流,所以在交流侧产生 $6k \pm 1 (k = 1, 2, \dots)$ 次的特征谐波。 E_h 表示非线性负荷各次谐波功率。

从数据分析可知: 比较实验 1、2,对于整流负荷,触发角只会改变输送功率的大小,不影响各次谐波功率的输送方向; 比较实验 1、3,供电电源中含有的谐波分量对于由整流器负荷产生的各次

表 1 N1 和 I_{a1} 中主要的几次谐波含量

Tab. 1 Several main harmonic components in N1 and I_{a1}

| 实验 | | 3 次 | 5 次 | 7 次 | 11 次 | 13 次 | 17 次 | 19 次 |
|----|-------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
| 1 | 电压 | 0.0 | 1.40 % | 0.93 % | 0.48 % | 0.35 % | 0.18 % | 0.12 % |
| | 电流 | 0.0 | 18.28 % | 12.18 % | 6.31 % | 4.61 % | 2.30 % | 1.55 % |
| | E_h | 0.0 | - 0.32 | - 0.14 | - 0.037 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 2 | 电压 | 0.0 | 1.44 % | 1.01 % | 0.65 % | 0.56 % | 0.41 % | 0.39 % |
| | 电流 | 0.0 | 19.61 % | 13.76 % | 8.74 % | 7.54 % | 5.61 % | 5.23 % |
| | E_h | 0.0 | - 90 | - 43 | - 18 | - 13 | - 7.4 | - 5.8 |
| 3 | 电压 | 2.29 % | 1.46 % | 0.96 % | 0.53 % | 0.40 % | 0.22 % | 0.16 % |
| | 电流 | 13.61 % | 18.59 % | 12.51 % | 6.82 % | 5.15 % | 2.90 % | 2.10 % |
| | E_h | 0.37 | - 0.36 | - 0.15 | - 0.044 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

谐波电流影响很小,从而验证了整流器负荷可以近似等效为与电压不相关的谐波电流源; E_h 值为负值,即向外发送谐波功率,从而谐波源用户按电能表计量值少交电费,而受谐波污染的线性用户却需多交电费。

2) Matlab 中电弧炉仿真实验

常见的非线性伏安特性负荷包括变压器、荧光灯、电弧炉等,这些负荷的伏安特性曲线为非线性。其中,对于荧光设备,伏安特性在适当的励磁范围内基本为线性关系;对于变压器,考虑磁体的磁滞现象,磁密和励磁电流的变化呈非线性关系,即使励磁电流是正弦波,相应的磁通并非正弦变化;而对于电弧炉,其伏安特性曲线在熔断的不同阶段随时间变化,其电流不规则地急剧变化,使电流波形严重畸变,引起电网电压波形严重畸变。

根据文献[3,4],可得出具有非线性伏安特性的电弧炉、荧光灯负荷具有类似的伏安特性曲线,如图3所示。

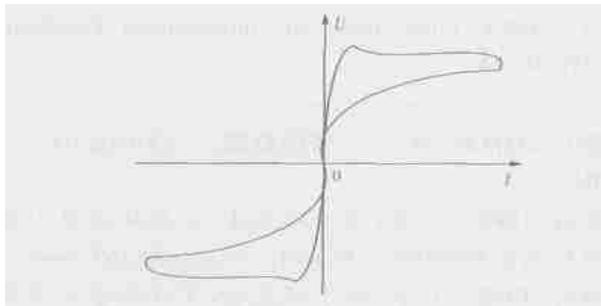


图3 非线性伏安特性曲线

Fig. 3 Non-linear V/A characteristic curve

图4对于不同的 $U - I$ 分段对图3近似线性化。对于不同区段的伏安特性用不同的斜率 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 来表征,在正半周期内各个斜率所代表的物理意义如下。

R_1 : 电弧从熄灭到重建的初始阶段,电弧表现为一定值电阻。其阻值较大,与建弧电压相关。

R_2 、 R_3 、 R_4 对应于电弧建立阶段。 R_2 表征为当电流增加时电压的变化趋势,由于此时电弧电压实际上恒定的,因此其阻值接近于零; R_3 表征为由于另一相的电弧重燃导致电弧电压的下降,其阻值大小与三相不平衡有关。 R_4 表征为电弧熄灭前电压的变化趋势,在本文的近似线性模型中,取其阻值与 R_2 相同。最后斜率 R_1 的阶段与电弧熄灭相对应。

在 Matlab 中搭建含有电弧炉非线性负荷的电路,输电线长度 $D = 50 \text{ km}$, $r = 0.1 \text{ } \Omega / \text{km}$, $x = 0.4 \text{ } \Omega / \text{km}$,电弧炉采用上述近似线性化模型,如图5。

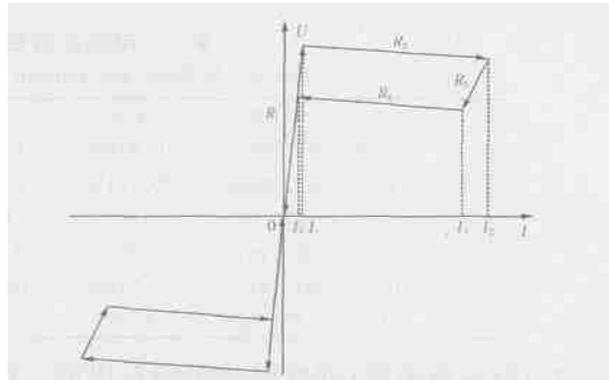


图4 伏安特性曲线的近似线性化

Fig. 4 Approximate linearization of V/A characteristic curve

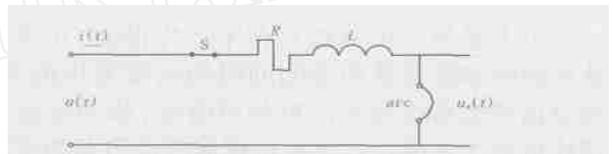


图5 带电弧炉负荷的测试电路

Fig. 5 Testing circuit with arc furnace load

实验1:当电压源为标准正弦电压源时,电弧炉负荷各次电压、电流含量以及谐波功率流向。其电流、电压波形如图6。

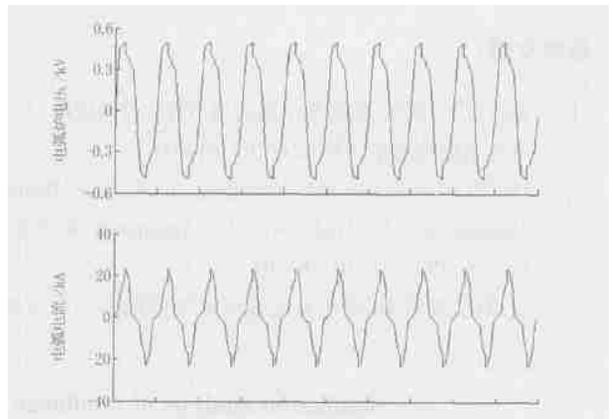


图6 电弧炉的电压、电流波形

Fig. 6 Voltage and current waveforms of arc furnace

实验2:当电压源含有三次谐波分量时,电弧炉负荷各次电压、电流含量以及谐波功率流向。实验结果详见表2。

从以上数据分析可知:与换流器负荷相比,电弧炉电压、电流谐波所占比重更大;施加在电弧上电压的变化对电弧电流的影响很大,从而证明了谐波电流源模型不适合非线性伏安特性负荷;从谐波功率 E_h 的符号可以看出:非线性负荷向系统发出谐波功率。对于实验2的三次谐波功率为正,是由于电

表2 电弧负荷各次电压、电流含量以及谐波功率

Tab. 2 Voltage and current components and harmonic power of arc load 单位: Wh

| | | 1次 | 3次 | 5次 | 7次 | 9次 | 11次 | 13次 |
|--------|-------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 实 验 | 电压 | 69.795 % | 10.919 % | 1.565 % | 0.541 % | 1.848 % | 0.81 % | 0.167 % |
| | 电流 | 67.356 % | 20.721 % | 2.967 % | 1.024 % | 3.499 % | 1.544 % | 0.31 % |
| 1 | E_h | 276.08 | - 13.572 | - 0.278 6 | - 0.033 2 | - 0.387 9 | - 0.075 | - 0.003 1 |
| 实 验 | 电压 | 66.916 % | 20.387 % | 9.094 % | 2.722 8 % | 1.035 3 % | 1.971 3 % | 1.356 4 % |
| | 电流 | 63.791 % | 22.218 % | 18.422 % | 5.517 9 % | 2.099 8 % | 3.976 8 % | 2.760 3 % |
| 2 | E_h | 271.65 | 21.62 | - 10.69 | - 0.958 6 | - 0.138 7 | - 0.500 2 | - 0.238 9 |

源本身含有三次谐波,而此时从电弧发出的三次谐波功率小于电弧从系统吸收的三次谐波功率。

3 结论

电力系统中的线性负荷不产生谐波,非线性负荷在吸收系统基波功率的同时向系统发出谐波,这部分谐波被系统及线性负荷所吸收,从而对系统和线性负荷产生危害。本文根据非线性负荷的不同作用机理,对其进行分类,并对两种不同类型的非线性负荷仿真结果表明了结论的准确性。当存在谐波功率时,根据式(10)、(11)可知,谐波源用户按电能表计量值少交电费,而受谐波污染的线性用户却要交电费。

参考文献:

- [1] 梁志成,马献东.实时数字仿真器 RTDS 及其应用[J].电力系统自动化,1997,21(10):61-64.
LIANG Zhi-cheng, MA Xian-dong. Real Time Digital Simulator and Its Application [J]. Automation of Power Systems, 1997, 21(10):61-64.

- [2] 夏道止,沈赞垠.高压直流输电系统的谐波分析及滤波[M].北京:水利电力出版社,1994.
XIA Dao-zhi, SHEN Zan-yin. Harmonic Analysis and Filtering of HVDC Power Transmission Systems[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1994.
- [3] Carrillo C, Cidras J. Harmonic Model for the Fluorescent Lamp[A]. IEEE Proceedings of 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power. 1998. 1211-1217.
- [4] Terzija V V, Koglin H J. Long Arc In Still Air: Testing, Modeling, Simulation and Model Parameter Estimation[A]. IEEE Proceedings 9th International Conference. 2000. 36-44.

收稿日期: 2004-06-18; 修回日期: 2004-08-03

作者简介:

孙荣富(1982-),男,硕士研究生,主要从事电力系统故障在线检测方面的研究; E-mail: ericsunf@163.com

刁婷婷(1982-),女,硕士研究生,主要从事电力系统仿真及故障诊断的研究;

舒乃秋(1954-),男,教授,主要从事传感器及检测仪表技术方面的研究。

Simulation analysis of nonlinear load harmonic source in power system

SUN Rong-fu, DIAO Ting-ting, SHU Nai-qiu, LI Chang-yu

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

Abstract: In theory, non-linear load absorbs fundamental power from the power system, and injects harmonic power into the system as the harmonic source of the power system. From the view of power direction, this paper validates harmonic power directions of two kinds of nonlinear load through respective models according to different function mechanisms. Test results show that nonlinear load distorts system voltage and current and injects harmonic power into system, which proves the correctness of theoretical analysis.

Key words: non-linear load; harmonic source; RTDS

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告