

电力机车谐波与无功功率仿真分析

关巧莉<sup>1</sup>,孙 健<sup>2</sup>,王宝安<sup>1</sup>

(1.东南大学电气工程学院,江苏 南京,210096;2. 江苏省电力公司电力科学研究院,江苏 南京,211103)

**摘 要:**提高非线性系统无功功率计量的准确性是提高电力系统电能质量管理和安全运行的需要。介绍了电力机车的系统结构和功能,在 Matlab 中建立仿真模型,分析电力机车的电流和电压谐波含量。通过几种典型的无功功率测量算法测量电力机车的无功功率,仿真结果表明 Hilbert 算法和傅氏算法的测量结果相对误差较小,无功功率计量的准确性较高,而均方根算法的测量误差较大。

**关键词:**谐波分析;Matlab;电力机车;无功功率仿真

**中图分类号:**U264      **文献标志码:**B      **文章编号:**1009-0665(2012)01-0049-03

随着电气化铁路的发展,电力电子装置和非线性负载大量使用,谐波已影响到电网和设备的安全运行,因此须对非线性负载的谐波特性进行具体分析。目前正弦电路中无功功率的概念及计算公式已经非常清晰,但在非正弦电路中无功功率的定义及计算公式还处于探讨和研究阶段。由于非正弦条件下无功功率的定义尚无明确的界定,使得无功功率的测量也一直受到人们广泛的关注。目前常用的无功功率测量算法是基于 Budeanu 频域无功功率定义的,主要的测量算法有:均方根算法、傅氏算法、Hilbert 变换测量算法。

在电力机车等非线性负载快速发展的今天,传统的电磁式跨相电能表和基于基波移相 90° 原理制成的电能表已呈现出缺点,即在含有大量谐波的情况下,这 2 种电能表的误差较大,无法准确测量非线性系统的无功功率,继而给电网的电能质量管理及安全运行带来一定的影响。因此采用合理的非正弦无功功率理论以及研究更先进的无功功率测量技术成为一种发展趋势。目前还鲜有对电力机车等非线性负载进行无功功率测量的研究。以韶山 8 型电力机车为例,采用 Hilbert 算法、均方根算法和傅里叶算法测量电力机车的无功功率,仿真可见,相对于 Hilbert 变换算法,傅氏算法的测量误差较小而均方根算法的测量误差大,可作为中频炉、变频器等非线性负载无功功率测量的参考。

1 电力机车的结构和基本模型的构建

韶山 8 型电力机车属于交-直传动相控电力机车,主电路由整流回路和牵引回路组成。整流回路输出直流电压  $U_d$  供给牵引电机,从而驱动机车行驶。电力机车主变压器为三绕组变压器,用来改变输入电压等级,供给整流电路。整流电路包括 4 个

二极管和 6 个晶闸管,基本连接方式参照图 1。机车的运行工况与整流回路晶闸管的导通角及机车主变牵引绕组的投入数目密切相关,通过改变晶闸管的导通角或牵引绕组数目即可以控制机车运行于不同的工况。韶山 8 型电力机车的主要电路结构如图 1 所示。

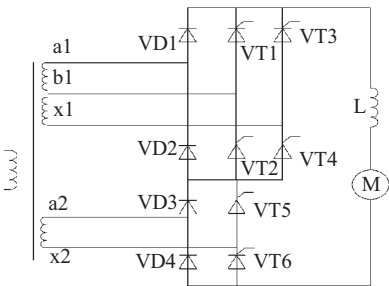


图 1 韶山 8 型电力机车主电路结构

图中:L 为平波电抗器;M 为牵引电动机电枢绕组;a1-x1 和 a2-x2 为牵引绕组。韶山 8 型电力机车采用晶闸管相控整流电路,整流采用多段桥式整流。通过牵引绕组的投入与晶闸管相控角的变化来实现输出电压的调节。

文献[1]分析了 SS8 型电力机车电路的工作原理和特性,文献[2]研究典型电力机车的负荷构成特性及比重,得出电力机车的负荷特性主要是由牵引回路的特性决定的。文献[3]以 SIMULINK 为工具建立了交流牵引供电系统的仿真模型,并将其应用于负荷投运和故障 2 种状态下对继电保护装置的影响。文献[4]建立了一种电力机车牵引工况下的简化数学模型,定量计算了机车产生的谐波电流。由文献[5]可知,当牵引电机工作于某一稳态运行点时,其电气特性可以用电阻描述,阻值由电机本身结构特性和转速决定。因此电动机车负载可以用一电阻等效替代,根据此在 Matlab 中建立了基本模型,如图 2 所示。

在基本模型中牵引变压器输出侧电压为 35

kV，牵引变压器的阻抗与牵引网阻抗折和为 $RL1$ ， $R_1=1\ \Omega$ ， $L_1=0.1\ \text{H}$ ，负载侧平波电抗器和电力机车负载折合为 $RL$ ， $R=0.2\ \Omega$ ， $L=20\ \text{mH}$ 。

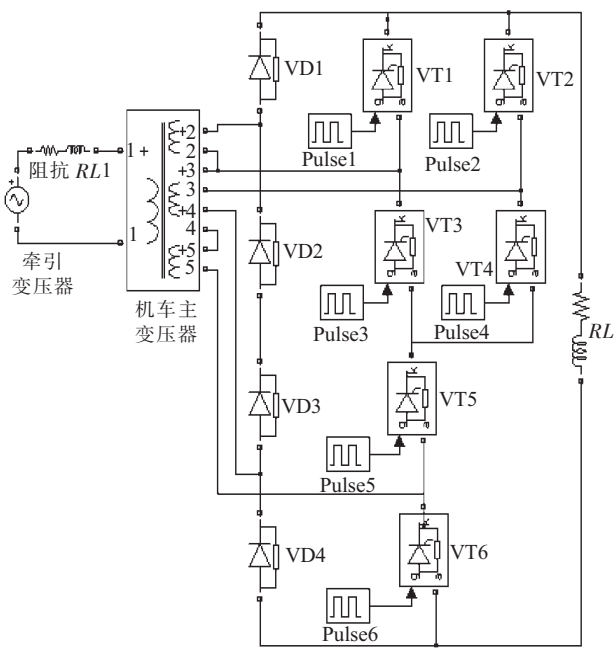


图 2 韶山 8 型电力机车的基本模型

2 电力机车的谐波分析

2.1 基于 FFT 变换的电流谐波分析

根据图 2，韶山 8 型电力机车的仿真模型使用 MATLAB/SIMULINK 中的电流测量模块即可得到输入电流波形如图 3 所示，对输入的电流波形进行 FFT 分析结果见表 1。

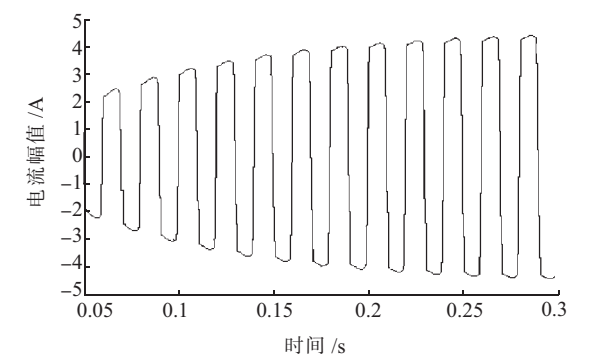


图 3 电力机车输入电流波形

通过 FFT 分析可以得到电力机车的输入电流各次谐波含量，该输入侧电流中 3,5,7,9 次谐波含量较大，基波电流值为 5.748 A，电流谐波畸变率为 33.90%，谐波电流值为 1.948 6 A，基波电流在总的电流中所占比例为 74.68%，谐波电流所占比例为 25.32%。

2.2 基于 FFT 变换的电压谐波分析

根据图 2，韶山 8 型电力机车的仿真模型使用

表 1 电力机车输入侧电流的谐波含量分析

谐波次数	谐波含量 / %	谐波次数	谐波含量 / %
1	100	11	1.66
2	1.28	12	1.23
3	29.34	13	0.97
4	1.40	14	1.06
5	14.20	15	0.75
6	1.48	16	0.91
7	7.24	17	0.63
8	1.48	18	0.77
9	3.52	19	0.60
10	1.39	20	0.64

MATLAB/SIMULINK 中的电压测量模块即可得到输入电压波形如图 4 所示，对输入电压波形进行 FFT 分析结果见表 2。

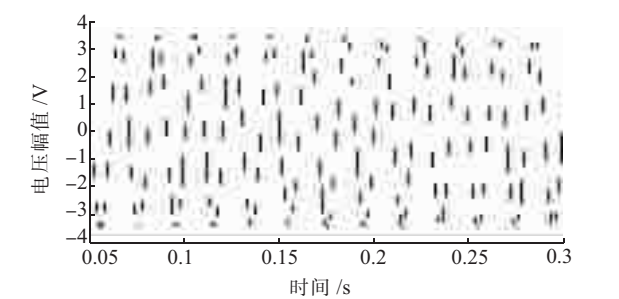


图 4 电力机车输入电压波形

表 2 电力机车输入侧电压的谐波含量分析

谐波次数	谐波含量 / %	谐波次数	谐波含量 / %
1	100	11	0.09
2	0.01	12	0.08
3	0.45	13	0.06
4	0.03	14	0.08
5	0.36	15	0.06
6	0.05	16	0.07
7	0.26	17	0.05
8	0.06	18	0.07
9	0.16	19	0.06
10	0.07	20	0.07

对电力机车输入侧电压进行 FFT 得到谐波各次含量见表 2，由分析知基波电压为 35.29 kV，电压谐波畸变率为 0.91%，谐波电压为 321.1 V，基波电压在总的电压中所占比例为 99.10%，谐波电压所占比例为 0.90%。

3 电力机车的无功功率分析

3.1 仿真模型的建立与仿真

采用 3 种无功功率测量算法即均方根算法、傅里叶算法和 Hilbert 算法进行仿真。

均方根算法主要利用功率三角形定理，通过对电压、电流值进行采样，得到离散的电压、电流值，再

对电压有效值、电流有效值、有功功率以及视在功率进行计算,最后通过功率三角形定理计算出无功功率,这种算法考虑了谐波的状况,但是概念比较模糊,没有明确的物理定义,且其计算所得到的无功功率没有方向性,但其测量算法比较简单。

傅里叶算法是通过对电压、电流进行傅里叶分解,得到各次谐波的电压、电流有效值及其相位差,再通过将各次谐波的无功功率相加得到整个系统的无功功率。傅里叶算法的最大特点就是计算量大,运算速度慢,实时性不好,但是理论上该方法误差为 0。

Hilbert 变换算法属于软件实现的数字移相,能够对电压各次谐波成分进行精确的 90° 移相,并保持谐波幅值不变。当电压信号移相 90° 后,可以采用有功测量的方法来进行无功测量。这种算法与傅里叶算法相比,运算速度快,实时性比较好。Hilbert 算法是目前使用较多的一种测量算法,且测量误差较小,测量结果较精确。

电力机车的无功功率测量步骤为:通过电压和电流测量模块测量仿真模型得到谐波电压和电流的采样值,输入到工作区 Workspace 之后,结合无功功率的 3 种测量算法仿真得到非线性系统的无功功率。具体模型如图 5 所示,图中 C-M 为电流测量模块,V-M 为电压测量模块,其他元件及参数见图 1。

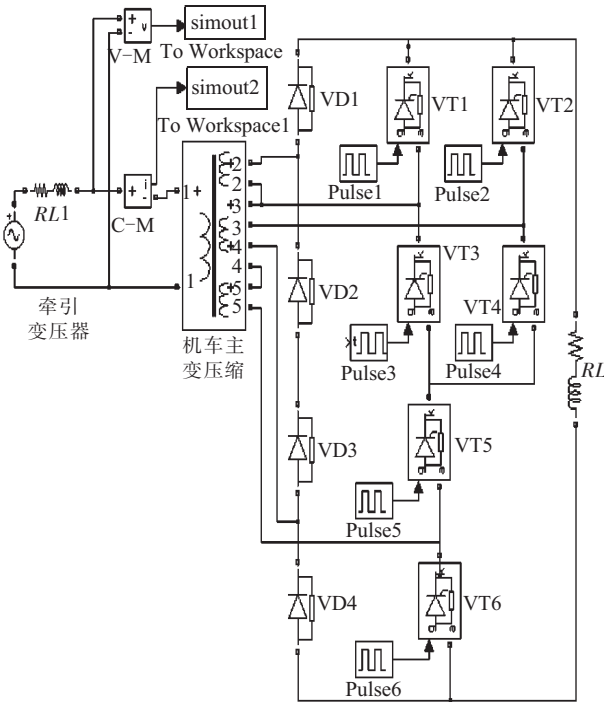


图 5 电力机车的无功功率基本仿真模型

3.2 仿真结果

在 Hilbert 算法、傅里叶算法和均方根算法 3 种不同测量算法下,电力机车的无功功率仿真结果如

表 3 所示。由于 Hilbert 算法测量无功功率的精度较高,文中将 Hilbert 算法的仿真结果作为参考进行误差比较,仿真时间为 1 个电源周期,傅氏算法考虑到 80 次谐波。

表 3 无功功率仿真结果

算法	无功功率 /Var	相对误差 / %
Hilbert 变换算法	33 881	
傅氏算法	33 882	-0.00295
均方根算法	34 203	-43

由表 3 可知,对于电力机车无功功率的测量,相对于 Hilbert 算法,傅氏算法的误差较小而均方根算法的测量误差较大。由此可见,均方根算法在测量含有高次谐波的负载无功功率时测量误差较大。通过傅里叶分析可以得到电机车前 20 次谐波的无功功率,如表 4 所示。

表 4 前 20 次谐波的无功功率

谐波次数	无功功率 /Var	谐波次数	无功功率 /Var
1	34 107	11	-0.000 2
2	-0.000 0	12	-1.000 0
3	-134.00	13	-1.000 0
4	-0.000 0	14	-1.000 0
5	-52.000	15	-0.000 0
6	-1.000 0	16	-1.000 0
7	-19.000	17	-0.000 0
8	-1.000 0	18	-1.000 0
9	-6.000 0	19	-0.000 0
10	-1.000 0	20	-0.000 0

由表 4 可以看出,傅里叶分解算法计算电力机车总的无功功率为 33 882 Var,其中前 20 次谐波的无功功率为 33 885 Var,在总的谐波无功功率中所占比例为 100.01%,20 次以上的谐波无功功率所占比例较小。

4 结束语

通过对电力机车电压和电流谐波特性分析可知,非线性负载电力机车的电流畸变较大为 33.90%,电压畸变较小为 0.91%。使用 Hilbert 算法、均方根算法和傅里叶算法测量电力机车的无功功率的仿真实验结果表明,傅氏算法的测量误差较小而均方根算法的测量误差较大。由于 Hilbert 算法和傅里叶算法是在对电压电流采样后,进行移相滤波或傅里叶变换,通过简单的数值计算测量无功功率,从而避免了均方根算法中通过测量计算电压、电流的有效值和有功功率、实在功率计算无功功率所带来的误差。

列及 1 台三绕组和 1 台两绕组变压器并列时变压器的负荷计算方法进行了分析,详细推导了其计算公式。根据推导的计算公式,利用 Visual Basic 6.0 编制计算程序。

#### 参考文献:

- [1] 国家电力调度通信中心.电网调度运行实用技术问答[M].北京:中国电力出版社,2000.
- [2] 张德本,陈 慧,罗树权.2 台变压器并列环流计算[J].电工技术,2002(4):17-18.
- [3] 李志平,王彦峰.有载调压分接头不匹配的变压器并联运行分析[J].广东输电与变电技术,2006(1):61-64.

- [4] 魏 涛,张洪涛,袁卫国,等.2 台电压比相近的变压器并列运行优化分析[J].河南电力,2008(2):29-31.

#### 作者简介:

黄明华(1960),男,江苏灌云人,工程师,从事电力工程的监督管理、输变电工程验收工作;  
李 红(1980),女,江苏连云港人,工程师,从事电网规划、设计及分析等相关工作;  
伏祥运(1977),男,江苏赣榆人,高级工程师,从事电力系统调度运行、电力系统分析等工作;  
衡思坤(1963),男,江苏徐州人,高级工程师,从事中压电网接地方式、电力设备管理等动作。

## Calculation of Load Allocation for Various Transformers Paralleled Operation

HUANG Ming-hua, LI Hong, FU Xiang-yun, HENG Si-kun  
(Lianyungang Power Supply Company, Lian Yungang 222004, China)

**Abstract:** Based on the actual situation, load calculation when transformers are operated in parallel under different conditions is studied. The calculation formulas of load allocation and circulating current are deduced, and then an applied computer program is developed based on Visual Basic 6.0. Application in practice shows that the calculation accuracy of the program can meet operation practice requirements.

**Key words:** transformer; parallel; ratio; circumfluence current

(上接第 51 页)

经过傅里叶分析各次谐波的无功功率可以看出在电力机车中低次谐波的无功功率较大而高次谐波的无功功率较小,可作为中频炉、变频器等非线性负载无功功率测量的参考,具有较高的实用价值。

#### 参考文献:

- [1] 李 伟,朱 凌,马志国.基于 Matlab/Simulink 的 SS8 型电力机车供电系统建模与仿真[J].大功率变流技术,2009(6):6-10.
- [2] 张广东,李欣然.基于 SIMULINK 的电力机车负荷特性仿真研究[A].中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十四届学术年会论文集(下册)[C]. 2008.
- [3] SHENOY U J, SHESHADRI K G, PARTHASARATHY K, et al. MATLAB/PSB Based Modeling and Simulation of 25 kV AC Railway Traction System. A Particular Reference to Loading

and Fault Conditions [C]. 2004 IEEE Region 10 Conference, 2004.

- [4] 李建华,豆风梅,夏道止.韶山 IV 型电力机车谐波电流的分析计算[J].电力系统自动化,1999,23(16):10-13.
- [5] 李欣然,张广东,朱湘友,等.基于 SIMULINK 的电力机车负荷特性研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2009,36(5):42-46.

#### 作者简介:

关巧莉(1986),女,安徽宿州人,硕士研究生,从事电能质量方面的研究工作;  
王宝安(1978),男,江苏扬州人,讲师,从事电能质量方面的研究工作;  
孙 健(1978),男,安徽人,工程师,从事电测计量与测试技术方面的研究工作。

## Harmonics Analysis and Reactive Power Simulation Analysis of Electric Locomotives

GUAN Qiao-li<sup>1</sup>, SUN Jian<sup>2</sup>, WANG Bao-an<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** Improving the accuracy of measurement of nonlinear systems' reactive power can meet the requirements of improving power quality management and safe operation. System structure and function of electric locomotive is introduced in this paper. Simulation model is built in Matlab to analyze its current and voltage harmonic content. The reactive power of electric locomotives is measured by several typical measurement algorithms. The simulation results show that the relative error is small by Hilbert algorithm and Fourier algorithm while measurement of reactive power is accurate, and measurement error of RMS algorithm exist big error.

**Key words:** harmonics analysis; Matlab; electric locomotives; reactive power simulation