

基于实测谐波数据的无源滤波器设计及仿真

韩其国, 陈 林, 章坚民

(杭州电子科技大学 自动化学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 为了更合理地设计滤波器, 并验证其滤波效果, 创建了一种基于实测谐波数据、按无功容量补偿法计算各滤波支路参数, 并用 Matlab 仿真对滤波效果进行验证的新方法。该方法以电流源叠加原理模拟谐波源, 并结合滤波器支路的仿真电路, 可以准确模拟谐波情况和滤波器的滤波效果, 显示滤波前后的电流电压波形。最后, 以某实际电力用户为例进行了各种滤波方案的对比设计, 提出了无源滤波器实际工程实施时需要注意的重要事项。研究结果表明, 该方法具有很强的通用性, 简单方便, 较好地解决了滤波器设计效果的模拟问题。

关键词: 谐波; 无源滤波器; Matlab 仿真

中图分类号: TM743; TN713

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2010)09-0092-05

Design and simulation of passive filter based on actual harmonic data

HAN Qi-guo, CHEN Lin, ZHANG Jian-min

(College of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to design a more reasonable filter and testify its effects, a new strategy was presented, the filter branches and their parameters were designed according to the actual harmonic data and by means of the reactive power compensation capacity, the filtering effects were evaluated by a developed Matlab simulation circuit. Combining with the harmonic current sources simulation based on the superposition principle and the filter branches, the conditions of harmonics and the filtering effects can be simulated exactly, and the current and voltage waveforms can be displayed. Several solutions of the filter were designed and compared for a real power consumer. In the end, some key engineering experiences of the passive filter were presented. The results show that the design strategy is universal and simple, and has given a good solution for filtering effects simulation.

Key words: harmonics; passive filter; Matlab simulation

0 引 言

在电力系统中, 随着大功率电力电子器件等非线性负载的大量应用, 给电网带来了大量谐波, 不但污染了电网, 而且使功率因数降低, 这不仅造成了额外的电能损耗, 有时还危及到设备的安全运行。

在消除谐波的问题上, 无源滤波器因结构简单、运行可靠、投资费用低等优点而被广泛使用。通常无源滤波器设计均基于理论计算法^[1], 该方法的优点是简单、方便, 缺点是滤波效果不直观; 滤波后的电流波形不能显示从而无法和实测的电流波形对比。

随着谐波分析仪器的的发展, 谐波的检测和分析已

经变得简单方便, 但是要根据实际测量的谐波数据较为准确地模拟谐波源却不易操作, 而仿真研究对于无源滤波器的设计工作十分重要。

本研究提出一种简单、通用、直观的 Matlab 仿真设计方法, 该方法能够根据实际测量的谐波数据准确模拟谐波源和滤波器的滤波效果、能显示滤波前后的电流波形, 从而可以和实测的电流波形对比。仿真结果有利于验证无源滤波器参数设计的合理性及可行性。

1 用户谐波分析

浙江某锻造公司配电系统主要参数如表 1 所示。

表1 某锻造公司配电系统参数表

10/0.4 kV 变压器短路阻抗 U_d	4.2%
变压器容量	250 kVA
主要负载(谐波源)	2 台中频加热炉
负荷性质	6 脉冲整流
低压侧系统短路容量	5.95 MVA
实际运行容量	350 kVA 以上

表2 各次谐波含量(国标值已折算)

谐波次数	2	3	4	5*	6	7*	8	9	10	11*	12	13*
实测电流值/A	14.12	8.68	4.79	94.54	3.13	52.52	3.74	9.84	4.97	80.02	7.62	101.83
国标值/A	46.41	36.89	23.21	36.89	15.47	26.18	11.31	12.50	9.52	16.66	7.74	14.28
谐波次数	14	15	16	17*	18	19*	20	21	22	23*	24	25*
实测电流值/A	4.80	5.67	2.49	19.35	1.57	15.54	1.19	4.19	1.03	13.66	1.38	11.69
国标值/A	6.55	7.14	5.77	10.71	5.12	9.52	4.64	5.30	4.22	8.33	3.87	7.14

由表2 数据可见,谐波以奇次为主,其中5、7、11、13 次谐波含量严重超标,23、25 次也超标。谐波电流波形如图1 所示。该工况基波电流为499.5 A,平均功率因数为0.85。该用户由于诸如此类的原因,经常导致用电不正常,而且每月还需要承担一定数额的用电罚款。因此,采取一定的措施消除谐波已经十分必要。

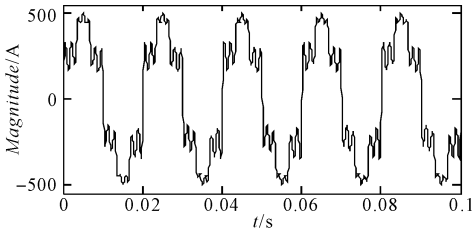


图1 实测谐波电流

2 方案设计

无源滤波器的设计方法有多种,本研究采用无功容量补偿法^[2-7]。该方法首先计算系统需要补偿的总无功容量;然后再按照一定的原则分配到各调谐支路及高通滤波支路;最后根据滤波器的基波无功补偿容量与支路参数的关系计算出电容、电感,再结合滤波器的品质因数便可以计算出各支路电阻值。

2.1 方案一

考虑到该用户5、7、11、13 谐波含量超标严重,先从最简单的方案做起,因此首先设计5、7、11 次三条单调谐滤波支路,如果效果不好,可以考虑再增设高通滤波支路。将该用户功率因数由0.85 补偿到0.98,共需补偿无功功率194.8 kVar。滤波器示意图如图2 所示。

按照无功容量补偿法编写 Matlab 程序计算各滤波支路参数如表3 所示。

笔者采用电能质量分析仪 Fluke1706 在2009-4-9 10:40:00~2009-4-10 9:20:00 时段对该用户400 V 配电总线侧进行了实地谐波监测,并获得了用户在该段时间的内三相电流谐波最大值、最小值、平均值和95% 概率值,数据三相基本对称,整理统计95% 概率值中谐波较大的数据如表2 所示,并以此作为滤波器设计结果分析比较的基础数据。

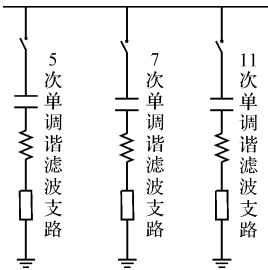


图2 方案一滤波支路示意图

表3 方案一滤波支路参数

滤波支路	5 次	7 次	11 次
Q_{fn}/kVar	88	36	67
$C/\mu\text{F}$	1 680.7	701.6	1 321.9
L/mH	0.241 1	0.294 7	0.063 3
R/Ω	0.008 4	0.014 4	0.004 9

2.2 方案二

方案一经仿真(具体仿真研究在下一小节讨论)发现,总体滤波效果很不错,各次谐波含量除13 次以外均达到国标要求。但是13 次谐波含量为15.00 A,国标值为14.3 A,只超出了0.7 A,超标很少。为了更好地滤除13 次谐波,现单独增设13 次单调谐滤波支路。滤波器示意图如图3 所示。程序计算得各滤波支路参数如表4 所示。

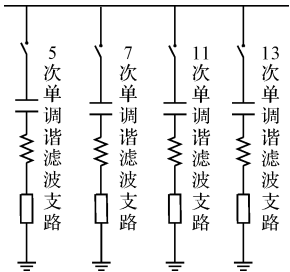


图3 方案二滤波支路示意图

表 4 方案二滤波支路参数

滤波支路	5 次	7 次	11 次	13 次
Q_{fn}/kVar	88	36	33	35
$C/\mu\text{F}$	1 680.7	701.6	651.1	692.2
L/mH	0.241 1	0.294 7	0.128 6	0.086 6
R/Ω	0.008 4	0.014 4	0.009 9	0.007 9

2.3 方案三

前两个方案中,尽管方案一的滤波支路少,但它基本满足了滤波要求;方案二的滤波效果非常理想,但滤波支路多,这意味着投资成本大。为了减少滤波支路,寻求更好的方案,本研究将 5、7 次单调谐和 11 次高通滤波支路作为方案三。高通滤波器在高于某个频率之后很宽的频带范围内呈现为低阻抗,使得高次谐波电流大部分流入高通滤波器。滤波器各支路示意图如图 4 所示。各滤波支路参数如表 5 所示。

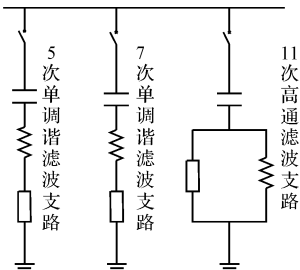


图 4 方案三滤波支路示意图

表 5 方案三滤波支路参数

滤波支路	5 次	7 次	11 次高通
Q_{fn}/kVar	88	36	72
$C/\mu\text{F}$	1 680.7	701.6	1 462.4
L/mH	0.241 1	0.294 7	0.058 5
R/Ω	0.008 4	0.014 4	0.202 0

3 仿真研究

3.1 谐波源的仿真方法

滤波器参数计算完成后,进一步的仿真研究有助于检验参数计算的正确性,但是实际的谐波源却往往很难模拟。比如仅用通用整流模块模拟具有整流性质的用户负载,则仿真过程中的谐波与实际负载谐波出入太大,滤波器的实际滤波效果可信度下降。而通过电能质量测试仪器(如本课题中的 Fluke1706)等对研究对象的直接测量,可获得指定时间段的谐波电压和电流数据,并通过傅立叶分解,输出各次谐波含量值。因此可以利用电流源叠加的方式产生谐波模拟实际谐波负载。24 个标准电流源如图 5 所示,用于模拟 2~25 次谐波,每个电流源的参数按照实际测量值填入。用这种方法恢复的谐波电流与图 1 的实测电流波形基本一致。因此,对于任意实际测量的谐波数据,都可以用这种方式较为准确的模拟谐波源。最后将图 5 封装成子系统,并搭建如图 6 所示的滤波器电气仿真图。

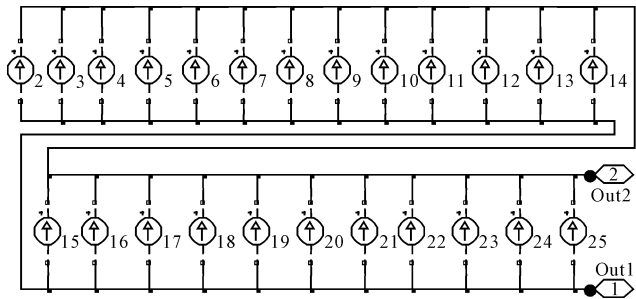


图 5 电流源叠加模拟谐波源

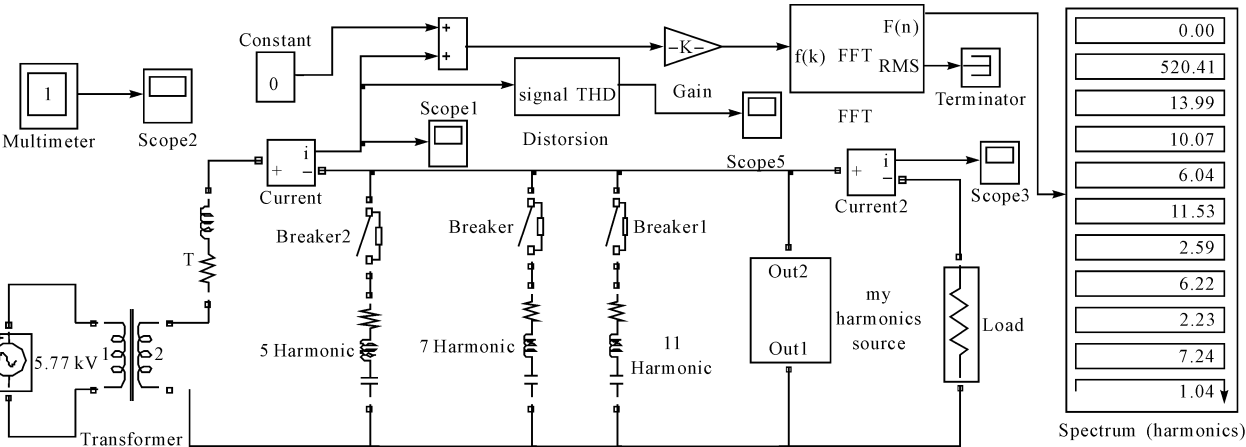


图 6 方案一滤波器仿真电路

3.2 供电变压器的仿真方法

本用户供电变压器容量为 250 kVA(10/0.4 kV),短路阻抗 4.2%,采用理想变压器加电抗模拟该变压器。图 6 中变压器“transformer”为一理想变压器,单相仿真

一次侧电压 5.77 kV,二次侧电压 230 V,其阻抗、感抗和漏磁等均设为 0,“T”为反映短路阻抗的电抗器。

3.3 各方案的仿真

为提高滤波效率,三条滤波支路放置在变压器二

次侧谐波源附近。各滤波支路参数按表3设置。负载Load的大小是根据实测基波电流大小设定的,即变压器二次侧电压除以基波电流等于负载阻值。图中“signal THD”为电流畸变率测量模块,“FFT”为快速傅里叶分析模块^[8],可以将滤波前后各次谐波含量显示在“Spectrum”频谱显示器里。频谱显示器中数值为滤波后各次谐波含量(0~19次谐波)。断路器控制3条滤波支路的通断,仿真时间设为0.2s,仿真算法选用ode23s(stiff/Mod. Rosenbrock)。在0.1s时投入滤波器,滤波前后效果如图7所示。

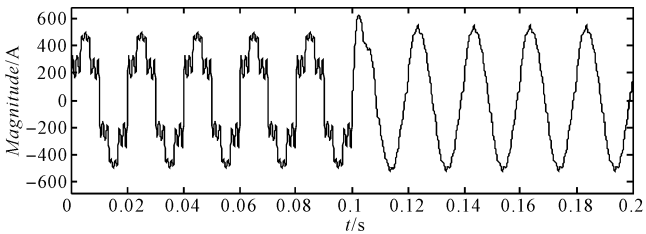


图7 方案一滤波前后电流波形(0.1s投入滤波器)

由图6的频谱显示器显示数据可知,方案一13次谐波含量略微超标,国标值为14.3A,而仿真后含量

为15.00A,其他各次谐波含量均已小于国标值。方案二和方案三的仿真电路与方案一的仿真电路类似,只需改变滤波支路即可,仿真后得到滤波前后电流波形分别如图8、图9所示。滤波后各滤波方案的谐波含量如表6所示。

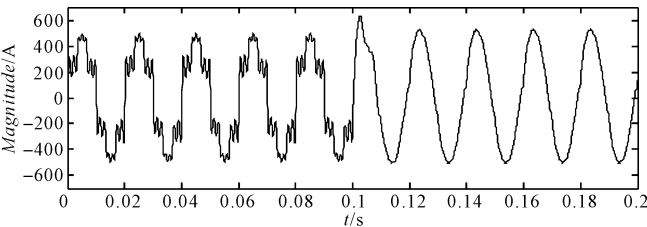


图8 方案二滤波前后电流波形(0.1s投入滤波器)

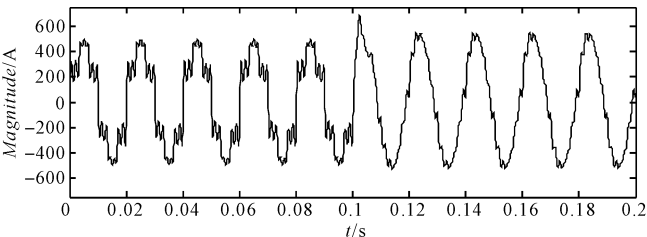


图9 方案三滤波前后电流波形(0.1s投入滤波器)

表6 滤波后各滤波方案的谐波含量

谐波次数	5°	7°	11°	13°	17°	19°	23°	25°
实测电流值/A	94.54	52.52	80.02	101.83	19.35	15.54	13.66	11.69
方案一	11.53	6.22	3.79	15.00	2.50	3.15	3.23	2.86
方案二	11.53	6.24	4.92	4.64	1.62	2.55	3.21	2.84
方案三	11.47	6.05	31.18	32.11	7.44	4.49	2.88	2.31
国标值/A	36.89	26.18	16.66	14.28	10.71	9.52	8.33	7.14

从图7~图9和表6数据可见,方案二的滤波效果十分理想,滤波后电流波形接近正弦波;方案一滤波后电流波形尚可,13次谐波含量略微超标,滤波效果也基本能满足要求;方案三改用11次高通滤波支路后,虽电流波形有较大改观,但滤波效果比较而言不够理想。

在上述3个方案中,方案二滤波效果最好,但其支路多,投资大;方案一滤波效果基本可以,其支路少,投资省。方案三与方案一比较则无可取之处了。实际实施可以综合考虑滤波效果和投资费用,对方案一、方案二作最后的取舍。

方案三效果不佳,这是由于高通滤波支路为高次谐波提供的低阻抗通路的阻抗值仍然不够小。如果系统阻抗对某次谐波的值比相应滤波器的阻抗值小,则该次谐波不会被滤除。因此,高通滤波器虽然有助于减少滤波支路,但对于含量很大的高次谐波仍然需要单独设计单调谐滤波器。对于含量超标但不严重的高次谐波,可以用高通滤波器来滤除。

4 结束语

以电流源模拟谐波源,它可以根据任意实测数据准确模拟实际谐波情况,具有很强的通用性,较好地解决了滤波器设计效果的模拟问题。采用理想变压器加电抗模拟变压器,是一种简便而实用的方法,也具有一定的通用性。

对于含量很大的高次谐波,高通滤波器不适用,而需要采用单调谐滤波器才能得到好的滤波效果。需要指出的是,文中各参数均为理论计算值,在实际工程中,需要根据市场上标准电容器型号参数作适当调整。为避免工厂停工时功率因数过补偿问题,实际滤波设备投切需要与产生谐波设备投切同步。每一滤波支路容量设计需考虑承担全年中可能出现的最大谐波电流,可以按典型的工况数据为依据,考虑适当余量。实际滤波设备还需要考虑系统其他谐波源的谐波电流注入而导致电流过载的问题。

- [9] OSUNA E, FREUND R, GIROSI F. An Improved Training Algorithm for Support Vector Machines [C]//Neural Networks for Singnal Processing-Proceedings of the 1977 IEEE Workshop. New York: [s. n.], 1997:276-285.
- [10] ZHOU Q, WU W, LIN J. AC-SPWM-Cycloconverter based on an Extended Chopper Scheme[C]. Proceedings of 7th

International Conf on Power Electronics. Daegu: [s. n.], 2007.

- [11] FLYM E P, SLATER R D, WOOD W S. Transient negative torques in induction motors due to rapid reconnection of the power supply[J]. **Proc. IEE**, 1969, 116(12):2009-2014.

[编辑:李 辉]

(上接第82页)

可适应不同轴距的拖拉机检测。台架没有电机驱动,简化了结构,可节省检测成本。

(3) 通过不同档位制动情况的检测试验,证明该试验台架能实时记录车辆制动过程,直观地反映出车辆制动性能的优劣,且工作可靠,可客观地评价拖拉机道路行驶中的制动性能。

参考文献(References):

- [1] Wrest Park History Contributors. Chapter 3 tractors and vehicles[J]. **Biosystems Engineering**, 2009, 103(1):36-47.
- [2] KIM J H, KIM K U, WU Y G. Analysis of transmission load of agricultural tractors[J]. **Journal of Terramechanics**, 2000, 37(3):113-125.
- [3] GB7258-2004 机动车运行安全技术条件[S]. 北京:中国标准出版社, 2004.

- [4] HEINRICHS B E, ALLIN B D, BOWLER J J, et al. Vehicle speed affects both pre-skid braking kinematics and average tire/roadway friction[J]. **Accident Analysis and Prevention**, 2004, 36(5):829-840.

- [5] 赵奇平,陈汉汛. 制动器性能试验智能 CAD 系统实现[J]. 武汉理工大学学报:信息与管理工程版, 2003, 25(4):15-18.

- [6] 黄孝慈,张海波. 整车制动性能检测技术的发展[J]. 上海工程技术大学学报, 2007, 21(1):41-45.

- [7] 王文山,马明星. 车辆制动检测实验台架的研制开发[J]. 成组技术与生产现代化, 2006, 23(2):12-15.

- [8] 茅庆潭. 几种汽车制动力检测设备的优缺点分析[J]. 交通标准化, 1999(4):6-7.

- [9] 蒋波,严朝勇. 影响反力式滚筒制动试验台检测精度的因素[J]. 农业装备与车辆工程, 2007, 189(4):36-38.

- [10] 曹一江,刘晓为,马兆铭. 光敏 Z-元件转速测量系统的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(8):1334-1336.

[编辑:柴福莉]

(上接第91页)

参考文献(References):

- [1] WU Guo-xiang, CHEN Guo-cheng, GAO Da-peng. An Investigation on Idle Load Cutting-in Control Strategy for Variable Speed Constant Frequency(VSCF) Wind Power Generation[C]. World Automation Congress, 2008. Chongqing: [s. n.], 2008.

- [2] 于文波,童建东,刘成斌,等. 变速恒频双馈风力发电机空载并网滑模控制[J]. 沈阳工程学院学报:自然科学版, 2007, 3(1):10-12.

- [3] 夏长亮,王慧敏,宋战锋,等. 变速恒频双馈风力发电系统空载并网积分变结构控制[J]. 天津大学学报, 2008, 41(11):1281-1286.

- [4] 李 岚,杨一雄. 双馈风力发电机空载并网控制[J]. 微特电机, 2009, 37(2):50-52.

- [5] 刘其辉,贺益康,张建华. 交流励磁变速恒频风力发电机

的运行控制及建模仿真[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5):43-50.

- [6] 刘其辉,贺益康,卞松江. 变速恒频风力发电机空载并网控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3):6-11.

- [7] 梁 亮,李建林,高志刚,等. 双馈感应式风力发电机并网研究[J]. 电气传动, 2008, 38(9):11-13.

- [8] 兰 华,刘座铭,童建东,等. 双馈风力发电机空载并网控制策略研究[J]. 继电器, 2008, 36(10):11-14.

- [9] MULJADI E, BUTTERFIELD C P, PARSONS B, et al. Effect of variable speed wind turbine generator on stability of a weak grid[J]. **IEEE Trans. Energy Convers**, 2007, 22(1):29-36.

- [10] HUGHES F M, ANAYS-LARA O, JENKINS N, et al. A power system stabilizer for DFIG-based wind generation[J]. **IEEE Trans. Power Syst.**, 2006, 21(2):763-772.

[编辑:李 辉]

(上接第95页)

参考文献(References):

- [1] [奥地利]WAKILEH G J. 电力系统谐波-基本原理、分析方法和滤波器设计[M]. 徐政,译. 北京:机械工业出版社, 2003.

- [2] 王兆安. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社, 1998.

- [3] 尉云峰. RC 有源滤波器优化综合技术研究[J]. 机电工程, 2002, 19(4):34-35.

- [4] 赵文强,陈国柱. 改进型 LCL 滤波器拓扑在有源滤波器

中的应用[J]. 机电工程, 2008, 25(12):39-42.

- [5] 张 宁,宋福根. 单调谐滤波器设计及其在谐波治理中的研究[J]. 电气技术, 2008, 13(6):27-28.

- [6] 张明江,纪延超,张妍芳. 无源滤波器方案设计探讨[J]. 黑龙江水专学报, 2008, 35(1):102-105.

- [7] 洪乃刚. 电力电子和电力拖动控制系统的 Matlab 仿真[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.

- [8] 洪乃刚. 电力电子和电力拖动控制系统的 Matlab 仿真[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.

[编辑:李 辉]