

一种电网尖脉冲干扰滤波器设计方法

郭海涛¹, 杨宏伟², 周军¹

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 东北电力大学输变电技术学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 提出了用分布电容可以忽略的磁芯电感器与寄生电感很小的穿心电容器相结合的尖脉冲干扰滤波器设计方案, 并详尽地给出了尖脉冲干扰滤波器的设计方法。阐述了磁芯电感器滤波原理, 给出了尖脉冲干扰滤波器的结构和原理, 给出了尖脉冲干扰滤波器磁材料与磁芯结构的选择方法、线圈匝数和磁芯截面积的计算方法, 给出了设计实例、实验方法以及实验结果。实验结果表明所提出的尖脉冲干扰滤波器设计方案是可行的。利用此方法可以设计出经济实用的尖脉冲干扰滤波器。

关键词: 尖脉冲干扰; 磁芯电感器; 直流偏磁; 滤波器; 磁化曲线; 电磁兼容性

Method for designing a sharp pulse disturbance filter

GUO Hai-tao¹, YANG Hong-wei², ZHOU Jun¹

(1. Electrical Engineering College, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

2. Power Transmission and Transformation Technology College, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: The scheme that the sharp pulse disturbance filter consists of the magnetic core inductor with negligible distributed capacitance and feed-through capacitor with small parasitic inductance is proposed. Moreover, the detailed method for designing the filter is given. To account for the method, the smoothing principle of the magnetic core inductor is given, and then the configuration and principle of the sharp pulse disturbance filter are given, and then the methods for choosing the magnetic material and the magnetic core structure and estimating the inductive coil turns and magnetic core sectional area are given, and then an example of design of the filter, and the process and results of an experiment are given. The experimental results show that the proposed scheme is applicable to suppressing sharp pulse disturbance. The economical and applied filter can be designed by using the given methods.

Key words: sharp pulse disturbance; magnetic core inductor; DC biasing magnetism; filter; magnetization curve; electromagnetic compatibility

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)22-0186-04

0 引言

工频电网中的尖脉冲干扰具有非周期性和随机性, 峰值可达 5 000 V, 上升前沿不超过 1 μ s, 持续时间往往也只有几个微秒, 出现频率可达 20 次/h。尖脉冲干扰的频谱成分主要集中在 25 kHz~1 MHz, 1 MHz 以上的高频成分能量比较小^[1-3]。尖脉冲干扰能使存储器中数据丢失, 程序被冲而使实时测控系统不能正常工作, 甚至烧毁集成电路芯片, 损坏计算机和其他仪器仪表。由于尖脉冲干扰持续时间短、非周期性而不易被发现, 使故障变得不可捉摸, 常把人们注意力引到软件是否有误方面而浪费了大量时间^[4-5]。尖脉冲干扰已经成为电磁兼容性研究的一个重要组成部分, 美国军标 MIL-STD-461B 和 MIL-STD-462 与我国军标 GJB151 和 GJB152 相对

应, 对尖脉冲干扰的波形和测试方法都做了相应的规定。

常用的抑制工频电网中干扰的方法有^[6]: (1) 电网滤波器; (2) 用能量补偿原理制成补偿电源; (3) 软件方法。因普通电容器和电感器分别存在寄生电感和分布电容, 方法(1)不适用于尖脉冲干扰的抑制。后两种方法因响应速度较慢等原因也不适用于尖脉冲干扰的抑制。目前常采用压敏电阻抑制尖脉冲干扰, 有一定的效果, 但由于其易于老化等原因压敏电阻只适用于尖脉冲干扰出现频率较低而且能量也较低场合^[7]。本文提出了一种尖脉冲干扰滤波器的设计方案, 该方案用分布电容可以忽略的磁芯电感器与寄生电感很小的穿心电容器相结合实现尖脉冲干扰的抑制。本文阐述了磁芯电感器滤波原理, 给出了尖脉冲干扰滤波器的结构与原理,

给出了尖脉冲滤波器的设计方法和具体的设计实例以及实验结果。

1 磁芯电感器滤波原理

变化的磁场中由于存在磁损耗使得磁感应强度的变化滞后于磁场强度的变化。在场强变化较小时,变化的磁场和磁感应强度都可视为正弦函数。在铁氧体磁环上均匀绕上线圈,令励磁电流 $I = I_m e^{j\omega t}$,则磁芯中磁场强度 H 、磁感应强度 B 及复磁导率 $\tilde{\mu}$ 分别为

$$H = H_m e^{j\omega t} \quad (1)$$

$$B = B_m e^{j(\omega t - \delta)} \quad (2)$$

$$\tilde{\mu} = \frac{B}{H} = \frac{B_m}{H_m} \cos \delta - j \frac{B_m}{H_m} \sin \delta = \mu' - j\mu'' \quad (3)$$

式中: δ 为 B 滞后于 H 的相角; $\mu' = B_m \cos \delta / H_m$; $\mu'' = B_m \sin \delta / H_m$ 。感应电压为

$$u = NS \frac{dB}{dt} \quad (4)$$

式中: N 为线圈匝数; S 为磁芯截面积。设磁路的平均长度为 l ,则磁芯中磁场强度为

$$H = \frac{NI}{l} \quad (5)$$

计算可得:

$$u = \frac{N^2 S \omega}{l} (\mu'' + j\mu') I \quad (6)$$

将磁芯电感器等效为 RL 串联电路,有

$$u = (R + j\omega L) I \quad (7)$$

比较式(6)和式(7),有

$$R = \frac{N^2 S \omega}{l} \mu'' \quad (8)$$

$$L = \frac{N^2 S}{l} \mu' \quad (9)$$

式(8)和式(9)表明,复磁导率中的实部分量 μ' 代表软磁材料能量的储存,代表感性;虚部分量 μ'' 代表能量的损耗,代表阻性。磁芯电感器的滤波可理解为:利用复磁导率的实部分量 μ' 代表的感性储存尖脉冲干扰的能量,并逐渐释放,使尖脉冲干扰幅值减小,宽度增加;利用复磁导率的虚部分量 μ'' 代表的阻性吸收尖脉冲干扰的能量,使尖脉冲干扰幅值减小。

但通常的磁芯电感器因匝间存在分布电容并不能抑制尖脉冲干扰,只有匝数很少分布电容可以忽略的磁芯电感器才能抑制尖脉冲干扰。

2 尖脉冲干扰滤波器结构与原理

尖脉冲干扰滤波器可采用 LC 滤波器,见图1。 L 为匝数很少的高磁导率磁芯电感器, C 为穿心电容器。 L 因其分布电容可以忽略而能够抑制尖脉冲干扰, C 因其寄生电感很小而可以抑制尖脉冲干扰,两者结合使用使尖脉冲干扰滤波器具有更好的抑制尖脉冲干扰的能力。

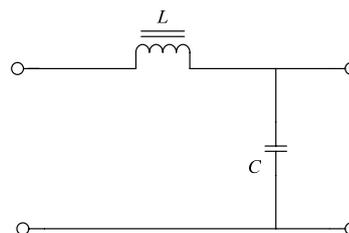


图1 尖脉冲干扰滤波器结构

Fig.1 Configuration of the filter with the magnetic core inductor

带尖脉冲干扰滤波器的直流电源的小功率5 V直流电源见图2(稳压部分略去)。图中 C_1 为滤波电解电容器, C_2 为高频旁路电容器, L 、 C 构成尖脉冲干扰滤波器。变压器次级输出的电压经整流后给滤波电解电容器 C_1 充电,在整流二极管中产生瞬时大电流 $i_d(t)$, $i_d(t)$ 每半个工频周期出现一次,峰值很大但持续时间很短,具有冲击性质^[8]。为了避免 $i_d(t)$ 导致磁饱和,尖脉冲干扰滤波器放在滤波电解电容器 C_1 之后。

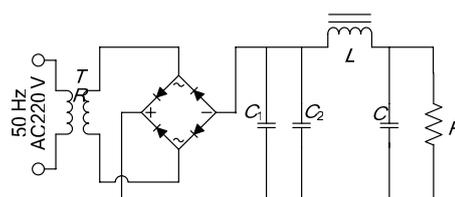


图2 带尖脉冲干扰滤波器的直流电源

Fig.2 Miniwatt DC source with the sharp pulse disturbance filter

3 尖脉冲干扰滤波器设计方法

3.1 磁材料的选择与磁芯结构

为了减小分布电容,必须减少电感线圈匝数;为了避免减少匝数引起的电感量的减小,应选用高磁导率磁材料做磁芯,应采用不带气隙的磁芯;为了避免高频时的损耗,应选择截止频率高的铁氧体材料^[9]。

将磁芯滤波器放在滤波电解电容器 C_1 之后,这样滤波之后带有纹波的直流电流将经过磁芯滤波器的磁芯,因而直流偏磁成为尖脉冲干扰滤波器设计

中的主要问题。为了避免直流偏磁导致磁饱和，也应尽量减少线圈匝数，并采用不带气隙的磁芯。

综上所述，可以选择无气隙环形高磁导率铁氧体材料的磁芯。

3.2 线圈匝数和磁芯截面积的选择

确定线圈匝数是一个很复杂的问题，这里给出简化的方法。

实际上流过图2中电感 L 的电流 i_L 由两部分组成：一是纹波直流成份 I_L ，二是经过电源变压器的尖脉冲干扰 $e'(t)$ 产生的电流 $i'_L(t)$ ；负载电阻 R 上的电压也由两部分组成：一是纹波直流成份 U ，二是 $e'(t)$ 经滤波后的输出电压 $u'(t)$ 。忽略电容器 C_1 和 C_2 对尖脉冲干扰的影响， $e'(t)$ 作用下尖脉冲干扰滤波器的等效电路见图3。根据电路理论^[10]可以求出 $i'_L(t)$ ， $u'(t)$ 与 $e'(t)$ ， L ， C 的关系，即可以根据不同滤波要求确定 L ， C 值。

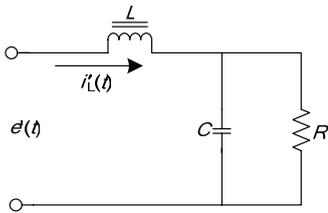


图3 尖脉冲干扰作用下滤波器等效电路

Fig.3 Equivalent electric circuit of the filter stimulated by the sharp pulse disturbance

由于 $B-H$ 曲线是非线性的，磁芯电感器 L 本质上为动态电感器。这里磁材料的工作状态实质上是在直流偏磁的状态下再加上脉冲磁化，原则上应该用直流偏磁下的脉冲磁化曲线来表征其磁特性。为简化计算用基本磁化曲线近似磁滞回线，把非线性的基本磁化曲线近似为线性（在饱和之前），如图4所示。图中 B_s ， H_{max} 分别为饱和磁感应强度和与其对应的磁场强度， (H_0, B_0) 表示直流偏磁状态。这样近似，可将非线性动态电感器视为线性电感器。另外，这里仅考虑磁芯电感器 L 的感性。假设磁导率不变，等于起始磁导率 μ_i 。

线圈匝数的选择要保证 $i'_L(t)$ 和 I_L 联合作用下磁芯不饱和。设所选磁材料饱和磁感应强度为 B_s ，则最大不饱和磁场强度为

$$H_{max} = \frac{B_s}{\mu_i} \quad (10)$$

设磁环半径为 r ，则线圈匝数为

$$N = 2\pi r H_{max} / i'_L(t)_{max} \quad (11)$$

式中， $i'_L(t)_{max}$ 为经过线圈的总电流的最大值，即

$$i'_L(t)_{max} = I_L + i'_L(t)_{max} \quad (12)$$

式中， $i'_L(t)_{max}$ 为 $i'_L(t)$ 的最大值。

因将 L 视为线性电感器，有

$$L = 4\pi \times 10^{-7} \mu_i \frac{N^2 S}{l} \quad (13)$$

由式（13）可求出磁芯截面积 S 。

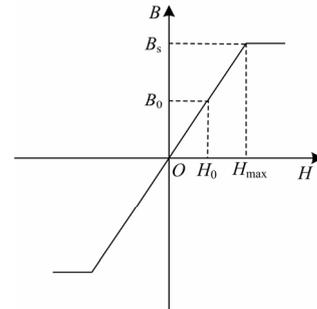


图4 磁化曲线的近似

Fig.4 Approximate curve of magnetization

4 实例与实验

滤波器设计要求：（1）能抗0.5 A的直流偏磁；

（2）符合美军军用标准。幅值为100 V的尖脉冲干扰经过滤波器后尖脉冲干扰幅值降至5 V以下，宽度展宽到200 μ s以上。

根据尖脉冲干扰作用下滤波器等效电路，通过数值计算（计算时用半个周期的正弦信号近似美军军用标准幅值为100 V的尖脉冲干扰，取负载 $R = 18 \Omega$ ），当 $C = 0.05 \mu$ F， $L = 9$ mH（已留有余量）即可满足要求，此时

$$i'_L(t)_{max} = 63.72 \text{ mA}$$

磁芯材料选择高磁通密度下使用的铁氧体材料IV，其成份为MnO 30/100，ZnO 15/100，Fe₂O₃ 55/100。这种系列的铁氧体材料 μ 可达3 000， B_s 可达5 200 G， $\tan\delta/\mu < 20 \times 10^{-6}$ （100 kHz）^[9]。

由式（10）得最大不饱和磁场强度为

$$H_{max} = \frac{5\ 200 \times 10^{-4}}{3\ 000 \times 4\pi \times 10^{-7}} = 138 \text{ A/m}$$

选半径 $r = 2.5$ cm的磁环，有 $l = 2\pi r = 15.7$ cm。

纹波直流成份 I_L 即为直流偏磁，因此有

$$i'_L(t)_{max} = 0.5 + 0.063\ 72 = 0.564 \text{ A}$$

由式（11）得线圈匝数为

$$N = 38 \text{ (匝)}$$

由式（13）得磁芯截面积为

$$S = 2.6 \text{ cm}^2$$

按上述参数设计的尖脉冲干扰滤波器系统是稳定的。

实验时, 利用自行研制的尖脉冲干扰发生器产生尖脉冲干扰, 按美国军标 MIL-STD-461B 和 MIL-STD-462 的规定, 按图 2 的电路将幅值为 100 V 宽度为 10 μ s 的尖脉冲干扰耦合到变压器次级和桥式整流电路之间。图 2 中 L , C 构成尖脉冲干扰滤波器。

取负载 $R = 18 \Omega$, 调节电源变压器以保证加到尖脉冲干扰滤波器上的纹波直流电压不超过 9 V。

利用示波器进行多次观察, 负载 R 两端的尖脉冲干扰幅值降为 4.9 V (大约), 宽度展宽为 260 μ s (大约)。

实验结果表明, 设计的尖脉冲干扰滤波器符合设计要求。

5 结束语

本文提出了用分布电容可以忽略的磁芯电感器与寄生电感很小的穿心电容器相结合的尖脉冲干扰滤波器设计方案, 给出了详尽的设计方法, 给出了具体的设计实例。理论分析与实验结果证明, 本文提出的尖脉冲干扰滤波器设计方案是可行的, 若参数选择合理, 磁性材料选择合适, 优化加工工艺的条件下, 滤波效果还可以改善, 并可以根据不同的负载电流设计出系列化的尖脉冲干扰滤波器。

为了便于阐述原理和突出需要解决的关键问题, 本文在理论推导中大量采用假设进行简化。经过这样的简化设计的滤波器的参数在实际使用中要经过调试和修正。另外, 磁芯电感器的制作方法及其是否合格也是很重要的问题。有关这方面的工作, 作者将另撰文阐述。

参考文献

- [1] Goedbloed J J. Transients in low-voltage supply networks[J]. IEEE Trans on EMC, 1987, 29 (2): 104-115.
- [2] 郎维川. 供电系统谐波的产生、危害及其防护对策[J]. 高电压技术, 2002, 28 (6): 30-31, 39.
LANG Wei-chuan. Generation and harm of harmonic in power supply system and the countermeasure[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28 (6): 30-31, 39.
- [3] 李明, 朱中文, 蔡伟勇. 电磁兼容技术研究现状与趋

- 势[J]. 电子质量, 2007 (7): 61-64.
- LI Ming, ZHU Zhong-wen, CAI Wei-yong. Research status and future trends of electromagnetic compatibility technology[J]. Electronics Quality, 2007 (7): 61-64.
- [4] 徐光冰, 朱昨庆, 高齐圣. 电气设备的电磁兼容设计[J]. 电子质量, 2007 (7): 73-76.
XU Guang-bing, ZHU Zuo-qing, GAO Qi-sheng. Electromagnetic compatibility design of electronic equipments[J]. Electronics Quality, 2007 (7): 73-76.
- [5] 邹澎, 周晓萍. 电磁兼容原理、技术和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
ZOU Peng, ZHOU Xiao-ping. Electromagnetic compatibility principle, technology and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [6] 陶时澍, 卢怀平. 国外工频电网中所含干扰信号的研究[J]. 电测与仪表, 1992, 29 (7): 7-13.
TAO Shi-shu, LU Huai-ping. Disturbances in some foreign electric networks[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 1992, 29 (7): 7-13.
- [7] 商斌雄, 彭济棠. 工业数字装置的抗干扰[M]. 北京: 电子工业出版社, 1988.
SHANG Bin-xiong, PENG Ji-tang. Anti-disturbance technique of industrial digital equipments[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1988.
- [8] 乔琛. 直流稳压电源设计[M]. 北京: 北京出版社, 1986.
QIAO Chen. Design of a stabilized DC voltage power supply[M]. Beijing: Beijing Publishing House, 1986.
- [9] 张世远, 路权, 薛荣华, 等. 磁性材料基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1988.
ZHANG Shi-yuan, LU Quan, XUE Rong-hua, et al. Magnetic materials foundation[M]. Beijing: Science Press, 1988.
- [10] 邱关源. 电路[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
QIU Guan-yuan. Circuitry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

收稿日期: 2009-11-28; 修回日期: 2010-05-13

作者简介:

郭海涛 (1965-), 男, 博士后, 副教授, 研究方向为信号处理、图像处理、模式识别、电力信息分析与处理、电气设备检测等; E-mail: ghtao2005@sina.com

杨宏伟 (1965-), 男, 学士, 副教授, 研究方向为电磁测量等;

周军 (1967-), 男, 硕士, 教授, 研究方向为微机在电力系统中的应用、电力电子技术及应用。

作者更正

刊登在《电力系统保护与控制》杂志 2010 年第 38 卷第 8 期, 题目为《故障录波装置中 IEC 61850 标准的研究与应用》的文章, 由于该文投稿作者的失误, 将该文第二作者的名字误写为“王皖豫”, 正确的姓名是“赵皖豫”。特此说明。