

尖脉冲干扰滤波器设计的关键问题

郭海涛¹, 周 军¹, 杨宏伟²

(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: 提出了用磁芯电感器与穿心电容器相结合的尖脉冲干扰滤波器设计方案。论述了磁芯电感器滤波原理, 给出并分析了该滤波器设计中的关键问题: 采用 LC 滤波器, 其中 L 为分布电容可以忽略的高磁导率磁芯电感器, C 为寄生电感很小的穿心电容器; 尖脉冲干扰滤波器放在低压电源滤波电解电容器之后; 选择无气隙环形高磁导率铁氧体材料的磁芯; 按所提出的计算方法确定线圈匝数和磁芯截面积。该方案能保证所设计的滤波器是经济、实用的。

关键词: 尖脉冲干扰; 直流偏磁; 滤波器; 磁化曲线

中图分类号: TN 713

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)09-0093-03

0 引言

工频电网中含有大量干扰, 尖脉冲干扰是其中一种, 它具有非周期性和随机性, 峰值可达 5 kV; 其上升前沿不超过 1 μ s, 持续时间往往只有几个微秒; 出现频率可达 20 次/h。尖脉冲干扰含有 25 kHz~1 MHz 的丰富的高频频谱成分, 1 MHz 以上的高频成分能量比较小^[1-5]。幅值超过额定值电压 3.5 倍的尖脉冲干扰能使存储器中数据丢失, 程序被冲而使实时测量和控制系统工作失效; 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^[6-10]。

抑制工频电网中干扰的一般方法有: 电网滤波器; 用能量补偿原理制成补偿电源; 软件方法^[11]。因普通电容器和电感器分别存在寄生电感和分布电容, 第 1 种方法不适用于尖脉冲干扰的抑制; 后 2 种方法响应速度较慢, 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的场合^[12]。本文提出了一种尖脉冲干扰滤波器的设计方案, 将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完成滤波功能。给出了磁芯电感器滤波原理, 并分析了该滤波器设计中的关键问题。

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。设场强变化较小, 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 以及复磁导率 $\tilde{\mu}$ 分别为^[13-14]

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

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

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

其中, 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

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

其中, 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

$$H = NI / l \quad (5)$$

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

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

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

由以上分析可知, 复磁导率中的实部分量 μ' 代表软磁材料能量的储存, 为感性; 虚部分量 μ'' 代表能量的损耗, 为阻性。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。

2 磁芯电感尖脉冲干扰滤波器结构

根据滤波器工作频率范围,可采用 LC 滤波器,见图 1。图中, C 为寄生电感很小的穿心电容器, L 为分布电容可以忽略的高磁导率磁芯电感器。

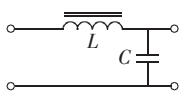


图 1 尖脉冲干扰滤波器结构
Fig.1 Configuration of sharp pulse disturbance filter

3 滤波器的位置

最简单的小功率 5 V 直流电源见图 2(为便于分析,稳压部分未画出)。图中 C_1 为滤波电解电容器, C_2 为高频旁路电容器。变压器次级输出的电压经整流后给 C_1 充电,在整流二极管中产生瞬时大电流 $i_d(t)$,其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。设 R_s 为变压器次级线圈电阻(包括初级反射到次级的电阻)与整流器内阻之和。由 R_s 、 f (工频)、 C_1 、 R (负载电阻)等值查 $i_d(t)$ 峰值曲线可确定其峰值 I_d ,如 $R_s=2\ \Omega$, $C_1=2000\ \mu\text{F}$, $R=18\ \Omega$,有

$$I_d \approx 9/2 = 4.5(\text{A}) \quad (10)$$

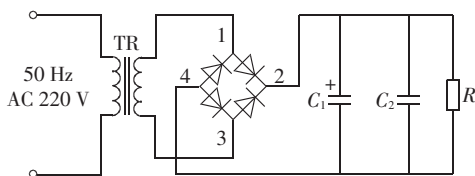


图 2 小功率直流电源
Fig.2 Low-power DC source

如果把滤波器放在电源的整流之后滤波之前,峰值较大的冲击电流 $i_d(t)$ 将使滤波器的磁材料饱和而无法有效地滤除尖脉冲干扰。为了避免 $i_d(t)$ 导致的磁饱和问题,磁芯滤波器应放在 C_1 之后, L 、 C 构成磁芯电感滤波器,如图 3 所示。

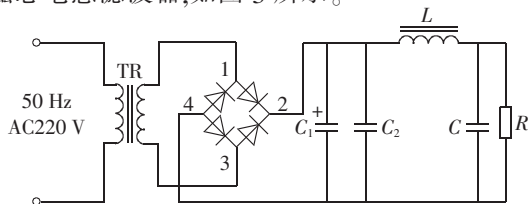


图 3 带尖脉冲干扰滤波器的小功率直流电源
Fig.3 Low-power DC source with sharp pulse disturbance filter

4 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电感量的减小,应选用高磁导率磁材料的磁芯,并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^[15]。

将磁芯滤波器放在 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,因而直流偏磁将成为磁芯电感器设计中的主要问题。为了避免直流偏磁导致的磁饱和,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。

5 线圈匝数和磁芯截面积的选择

无论是从减小分布电容,还是从避免磁饱和的角度,都要求磁芯电感线圈匝数尽可能少。确定线圈匝数是一个很复杂的问题,下文给出简化的方法。

流过图 3 中电感 L 的电流 i_L 实际上由 2 部分组成:一是纹波直流成分 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 2 部分组成:一是纹波直流成分 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 4。根据电路与系统理论^[16]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。

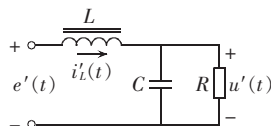


图 4 尖脉冲干扰作用下滤波器等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of filter with 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,采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 5 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,并假设磁导率不变,等于起始磁导率 μ_{in} 。

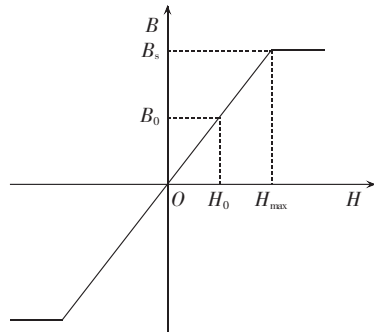


图 5 磁化曲线的近似

Fig.5 Approximation of magnetization curve

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

$$H_{\max} = \frac{B_s}{\mu_{\text{in}}} \quad (11)$$

设磁环半径为 r , 则线圈匝数为

$$N = 2\pi r H_{\max} / i_{L,\max} \quad (12)$$

其中, $i_{L,\max}$ 为经过线圈的总电流的最大值, 即

$$i_{L,\max} = I_L + i'_{L,\max} \quad (13)$$

其中, $i'_{L,\max}$ 为 $i'_L(t)$ 的最大值。

因将 L 视为线性电感器, 有

$$L = 4\pi \times 10^{-7} \mu_{\text{in}} \frac{N^2 S}{l} \quad (14)$$

其中, S 为磁芯截面积, 由式(14)有

$$S = 10^7 \frac{lL}{4\pi \mu_{\text{in}} N^2} \quad (15)$$

6 结语

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。给出了磁芯电感器滤波原理, 并分析了设计中的关键问题。为了便于阐述原理和突出需要解决的关键问题, 在理论推导中大量采用假设进行简化。经过简化设计的滤波器参数在实际使用中要经过调试和修正。

谨以此文纪念作者的导师——已故的陶时澍教授。

参考文献:

- [1] GOEDBLOED J J. Transients in low-voltage supply networks [J]. IEEE Trans on EMC, 1987, 29(2): 104-105.
- [2] 吴竞昌. 供电系统谐波[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998: 13-25.
- [3] 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 Weichuan. Generation and harm of harmonic in power supply system and the countermeasure[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(6): 30-31, 39.
- [4] 陆扬. 供电系统谐波的产生、危害及其防护对策[J]. 华东电力, 2003(10): 75-77.

- [5] 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 Zhongwen, CAI Weiyong. Research status and future trends of electromagnetic compatibility technology[J]. Electronics Quality, 2007(7): 61-64.
- [6] 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 Guangbing, ZHU Zuoqing, GAO Qisheng. Electromagnetic compatibility design of electronic equipments[J]. Electronics Quality, 2007(7): 73-76.
- [7] 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: 1-4.
- [8] 白同云. 电磁兼容设计实践[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 1-5.
- [9] 周志敏, 纪爱华. 电磁兼容技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 8-18.
- [10] 杨志忠, 高锡秋, 郭顺华. 电磁干扰的抑制方法[J]. 电力自动化设备, 1994, 14(3): 4-9, 14.
- [11] 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.
- [12] 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: 99-107.
- [13] 林其壬, 赵佑民. 磁路设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987: 520-530.
- [14] 王以真. 实用磁路设计[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1992: 53-63.
- [15] 王会宗. 磁性材料及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989: 110-111.
- [16] 容太平. 信号与系统[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2007: 37-47.

(编辑: 汪仪珍)

作者简介:

郭海涛(1965-), 男, 黑龙江安达人, 副教授, 博士后, 研究方向为图像处理、模式识别、信号处理、电力信息分析与处理、电气设备监测等(E-mail: guoht2010@126.com);

周军(1967-), 男, 吉林吉林人, 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;

杨宏伟(1965-), 男, 吉林吉林人, 副教授, 研究方向为电磁测量等。

Key techniques in sharp pulse disturbance filter design

GUO Haitao¹, ZHOU Jun¹, YANG Hongwei²

(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 design of a sharp pulse disturbance filter is proposed, which combines the magnetic core inductor with the feed-through capacitor. The working principle of the magnetic core inductor filter is described and the key techniques applied in filter design are given; LC filter is used, where L is a magnetic core inductor with high magnetic permeability and negligible distributive capacitance, C is a feed-through capacitor with little parasitic inductance; the filter is placed after the electrolytic capacitor of the low voltage power supply filter; the ferrite ring with high magnetic permeability is adopted; the winding number and the cross-sectional area of magnetic core are calculated by the given methods, which ensures the designed filter economical and practical.

Key words: sharp pulse disturbance; DC magnetic bias; filter; magnetization curve