

## SSDA 波形匹配在高频电源开关控制中的应用

陈树峰<sup>1</sup>, 姜斌<sup>1</sup>, 冒泽慧<sup>1</sup>, 陈祥<sup>1,2</sup>, 易辉<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016; 2. 南京国电环保设备有限公司, 南京 210044)

**摘要:** 针对高频电源开关控制问题, 提出改进序贯相似度检测(SSDA)的波形匹配方法来预测一次电流过零点, 以控制高频电源开关元件开通和关断来提高高频电源输出功率。通过对 SSDA 算法阈值设定方法的改进, 提高了该算法的匹配速度。首先, 对不同条件下的一次电流波形进行取点, 考虑波形采集过程的噪声, 依次采取低通滤波和算术平均滤波的方法对采样数据进行处理后建立波形库。利用改进 SSDA 波形匹配的方法, 根据匹配相似度较高的库中波形来预测目标波形的过零点时间, 从而控制电源开关。实验结果证明, 所提方法具有可实施性, 且有较快的匹配速度以及较高的匹配精度。

**关键词:** 开关控制; 高频电源; 序贯相似度检测; 相似度

**中图分类号:** V271.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2013)01-0069-05

## High-Frequency Power Supply Process Control Based on SSDA Waveform Matching

CHEN Shufeng<sup>1</sup>, JIANG Bin<sup>1</sup>, MAO Zehui<sup>1</sup>, CHEN Xiang<sup>1,2</sup>, YI Hui<sup>1</sup>

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Nanjing Guodian Environmental Protection Equipment Co., Ltd, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** This paper proposes a method based on improved SSDA waveform matching to forecast the zero-crossing point of primary current, and to increase the output power of high-frequency power supply by controlling the opening and shut-off of high frequency source control circuit. First, considering the noise in waveform sampling process, a waveform database was established through the sampling, low-pass filtering and arithmetic median filtering of primary current under different conditions. Then, by using the improved SSDA waveform matching and according to the waveform in the database, the zero-crossing of the target waveform was predicted to control the power switch. The experimental result showed that the method proposed here is feasible with high matching speed and matching precision.

**Key words:** switch control; high frequency power; SSDA; similarity

### 0 引言

高频电源主要采用开关控制方法得到高频交流电, 由于逆变电路开关控制方式以及开关元件自身的限制, 其输出效率尚存在提高的空间<sup>[1]</sup>。目前普遍采用高频电源开关控制方法, 该方法是通过软开关技术实现开关元件的零点流关断, 即零点后关断, 但是这样在实际控制中会降低电源的输出功率。因而, 通过预测过零点并提前发送控制信号的方法可以使得开关恰

好在零点附近开通及关断, 这样不仅能使电源运行更加稳定, 而且可提高电源输出功率。

传统过零点预测方法主要有安全点算法<sup>[2]</sup>、自适应校验算法<sup>[3]</sup>等, 然而这些算法需要建立数学模型来预测过零点。考虑到正常工作状态下, 相同开关控制频率下对应的一次电流波形基本相同, 因而考虑建立波形库, 使用波形匹配的方法来预测一次电流的过零点。波形匹配方法是通过度量函数来计算输入波形与波形库中波形的相似程度, 相似度越高则匹配程度越高。波形相似度计算方法常见的有距离以及相角测度, 如相关系数法、欧氏距离法<sup>[4]</sup>等。然而, 这些方法计算量大, 在时间方面很难满足现实问题的要求。

本文将图像匹配<sup>[5]</sup>方法中的 SSDA 法引入波形匹

收稿日期: 2011-10-21

修回日期: 2012-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(61034005)

作者简介: 陈树峰(1991—), 男, 安徽六安人, 硕士生, 研究方向为高频电源过程控制及故障诊断。

配中,利用其运算速度快的优势减少预测过零点时间。进一步对其进行改进,以提高精度及匹配效果,满足实际的应用需求。

### 1 高频电源过程控制

高频电源是把三相交流电整流形成直流电,通过逆变电路形成高频交流电,再经高频整流变压器升压整流,形成高频脉动电流,其工作频率一般在 20 ~ 50 kHz。其主电路拓扑如图 1 所示。

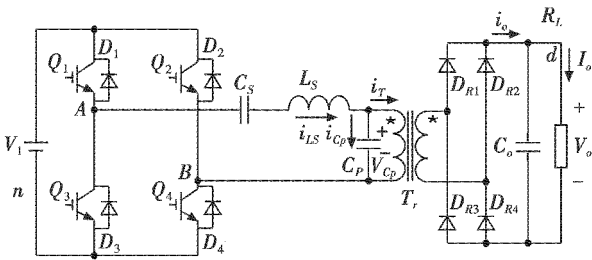


图 1 LCC 串并联谐振电路

Fig. 1 LCC series-parallel resonant circuit

当前的高频电源采用过零点开关控制,即零点后关断开关管,存在一定的输出间断,影响了高频电源输出效率。开关在零点前关断则存在电压电流,即功率损耗,同时也会对元器件造成冲击。开关电路的关断点电流越接近零点,一次电流越小,则电源运行也会越稳定。如图 2 所示,采用在零点前将  $Q_1$ 、 $Q_4$  关断,1  $\mu$ s 后立即开通  $Q_2$ 、 $Q_3$  的方法,此时波形明显压缩,功率将提高约 1 倍。

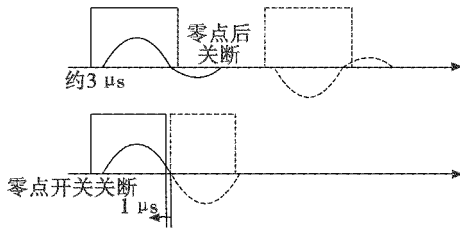


图 2 高频开关电源电流波形

Fig. 2 Current operation and improved waveforms

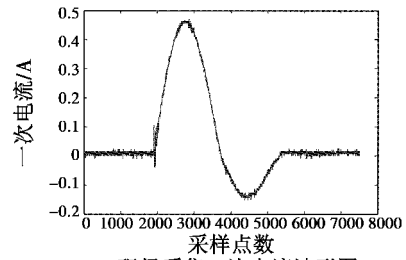
本文对过零点的预测采用波形匹配方法,该方法只需建立波形数据库,通过匹配提取出库内相同波形,根据已知波形给出一次电流零点时间,运算快速有效。

### 2 波形库建立

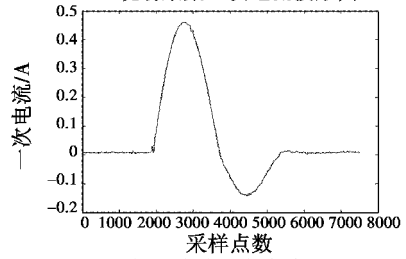
为了能准确地预测当前时刻电流的过零点时间,对电流波形进行采集建库,在高频电源实际运行过程中,利用现场波形与库中波形的相关性进行过零时间预测。由于在不同的设定参数下波形存在一定的差异,其过零点的时间也不同,但是由于参数设定有一定范围及规律,因而可以预先建立能反映高频电源电流波形特点的波形库,现场一次波形的大致形状如图 2 所示。

### 2.1 波形读取

图 3a 为现场采集的一次电流波形。在建立波形库时,所取波形应尽量避免噪声具有平滑的特点,从而保证波形匹配算法预测过零点的精度。由图 3a 可见,直接读取的一次电流波形存在高频噪声,因此采用低通滤波对现场波形进行初步去噪。根据高频电源工作频率为 20 ~ 50 kHz,设低通滤波的截止频率为 50 kHz。通过波形读取软件 Wave Analysis,使用低通滤波后对波形取点,其中采样时间 0.0016  $\mu$ s 为波形软件默认采样间隔。



a 现场采集一次电流波形图



b 低通滤波后电流波形图

图 3 低通滤波前后波形对比

Fig. 3 Waveform before and after low-pass filtering

### 2.2 算术平均滤波

由图 3b 可知,经过低通滤波后的波形已经较为平滑,为了减少波形库中每个波形的采样点数,减小波形库容量并提高波形匹配速度,而又不失波形的平滑性,本文采取了算术平均滤波的方法对波形进行处理。算术平均滤波<sup>[6]</sup>是通过一点和领域内各点的平均来去除突变的滤波方法<sup>[7]</sup>,它适用于对一般具有随机干扰的信号进行滤波,且运算简单、速度较快。本文中对波形采取连续取 5 个采样值进行算术平均运算的方法进行滤波,经过滤波后,图 3b 的波形如图 4 所示。

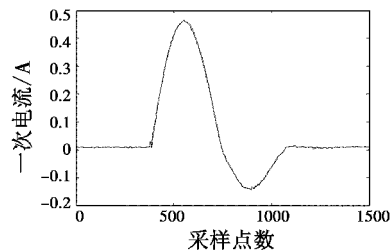


图 4 算术平均滤波后电流波形图

Fig. 4 Current waveform after mean filtering

### 2.3 取点

由于电路以及元器件特性影响,在电路接通瞬间

存在较大的噪声。如图 5a 所示,电流波形起始时存在震荡,但震荡范围并不大。因此为了增加波形匹配精确性以及快速性,在建立波形库之时设置最小值进行取点。考虑到波形起始处存在震荡,但波形匹配速度需要能够达到预测过零点的目的,最小值设置为 0.2,保证所取得的点既不在初始震荡范围内,又包含波形峰值。经上述过程处理获得的波形如图 5b 所示。

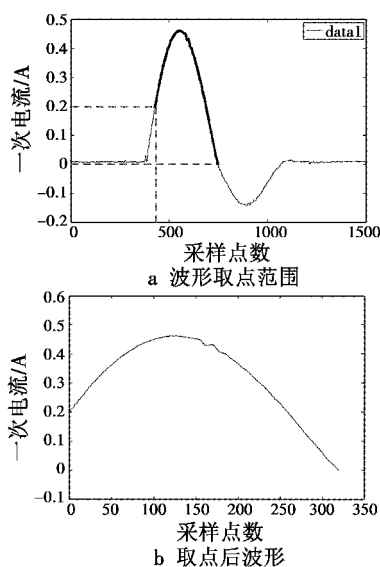


图5 取点前后波形

Fig. 5 Waveform before and after sampling

### 3 波形匹配方法

电流波形经过处理建立了波形库,并经过滤波与取点,获得了波形的各采样点的幅值。下面将利用采样点幅值信息对当前运行的电流进行过零点预测。当前电流的波形与库中的电流波形进行对比,将最接近的库中电流波形视为当前电流的运行波形,从而获得其过零点时间。其中,波形匹配的精度将直接影响预测结果。根据波形匹配速度以及匹配精度的综合要求,选用 SSDA 方法进行预测。

#### 3.1 SSDA 算法简介

传统的最小绝对误差算法(MAD)计算量大,匹配速度较慢,而序贯性相似度检测(SSDA)方法<sup>[8]</sup>能减少计算量,提高速度<sup>[9]</sup>。SSDA 算法用于波形匹配的主要步骤<sup>[10]</sup>如下所述。

1) 定义绝对误差。

$$X_j[i] = |S_j[i] - M[i]| \quad (1)$$

其中: $S_j[i]$ 是波形库中第  $j$  个波形的第  $i$  个采样点幅值; $M[i]$ 为待匹配波形的第  $i$  个采样点幅值, $j=1,2,\dots,n$ , $n$  为波形库波形总数。

2) 选定阈值  $T_i$ ,表示经过第  $i$  个点匹配后阈值,传统的 SSDA 算法中  $T_i$  为一恒定值。

3) 计算待匹配波形与波形库中第  $j$  个波形每个对应的采样点的绝对误差  $X_j[i]$ ,并将误差累加起来,直到误差大于  $T_i$  为止,记下累加次数  $N_j$ 。

4) 定义 SSDA 的检测曲面为

$$N_j = \{r \mid \min(\sum_{i=1}^r X_j[i] \geq T_i)\} \quad (2)$$

使得  $N_j(j=1,2,\dots,n)$  为最大的波形,即为匹配波形。

图 6 所示为待匹配波形采样点与  $A, B, C$  三个库中波形采样点之间的绝对累计误差曲线,可知波形  $C$  与待匹配波形的累计误差增长最慢,因而最有可能是匹配的波形。其中,坐标的横轴与纵轴分别代表匹配点的数目、匹配误差累计值。

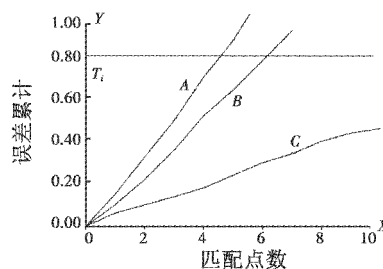


图6 SSDA 误差累计曲线

Fig. 6 Accumulated error of SSDA

#### 3.2 SSDA 改进方法

在序贯相似性检测算法中,阈值  $T_i$  的选择非常关键。如果阈值  $T_i$  设定太小,虽然能够减少运算时间,但不能保证匹配精度;如果阈值  $T_i$  设定太大,又不能有效地减少运算时间<sup>[11]</sup>。若可根据运行情况选用时变的阈值,则在保证精度的同时可提高一定的匹配速度。考虑到波形匹配中每个采样点间误差范围一定,本文采用线性函数作为阈值。匹配函数选择如下。

1) 选定初始阈值  $T_0$ ,在匹配过程中初始阈值  $T_0$  的设定应当较大,以保证匹配时所有波形库中波形全部能够进行匹配<sup>[12]</sup>,因此选取  $T_0=0.1$ 。

2) 匹配起始位置设定,由于波形库中波形相似度很大,且波形库的建立是采用了特殊的取点方式,前几个点的累计误差一般不大。为了减少阈值判定次数加快匹配速度,在匹配过程中采用前 10 个点只累计误差并不进行阈值判定,从第 11 个点开始进行阈值的判定的方法。

3) 线性阈值变化量选取,变化量选取根据波形幅值数量级确定为 0.05。

综上所述,测试波形阈值  $T_i = 0.1 + 0.05 * (i - 11)$ ,其中, $T_i, i(i \geq 11)$  分别代表匹配点的数目、匹配误差累计值。

图 7 所给的示例,在选取线性函数阈值之后,随着误差的积累, $A, B$  两个波形的累积误差很快超过了设定阈值而被排除, $C$  可以一直计算直至终点。从此例

可见,这种方法不仅能够提高匹配的速度,在匹配精度方面也有一定的改善。

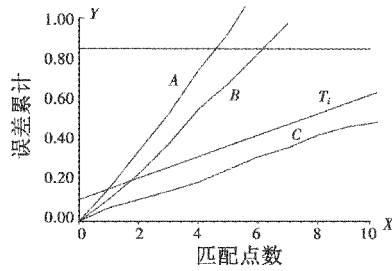


图 7 改进 SSDA 误差累计曲线

Fig. 7 Accumulated error of improved SSDA

### 4 匹配实验

#### 4.1 波形匹配流程

用上述的方法对现场采集的一次电流波形进行处理并进行匹配测试,从而验证匹配方法可行性,现场数据来自南京国电环保研究所。具体匹配过程如下所述。

1) 波形库建立:对现场采集的一次电流波形进行低通滤波之后,以波形读取软件的默认时间间隔读取幅值后建立一个 7500 \* 9 的矩阵。根据上文所述取点方法对波形某个周期的特定区域进行取点后组成 1680 \* 9 的波形矩阵,然后对各个波形进行算术平均滤波后建立一个 336 \* 9 的最终波形库。

2) 波形匹配:①输入待匹配波形,为了模拟现场波形匹配的预判性,此处输入待匹配波形峰值前的一部分;②对输入波形进行均值滤波,为了使采样波形同波形库中波形点的时间间隔相同,均值滤波的周期必须相同;③设定值比较,将滤波后的待匹配波形矩阵元素逐个与设定值比较,直到第一个大于等于设定值的点,记录此点位置;④从记录点之后开始读取待匹配波形,读取范围应在 1/4 ~ 1/2 个波形周期,这样既能保证匹配速度从而达到预测波形过零点的作用,又能保证匹配的精度。匹配流程如图 8 所示。

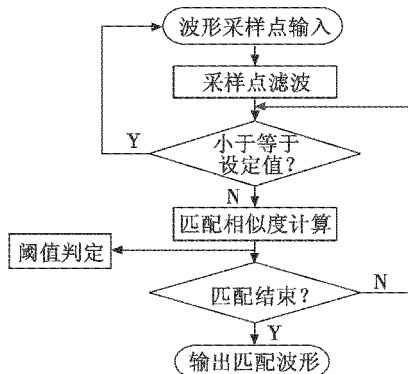


图 8 波形匹配流程

Fig. 8 Process of waveform matching

3) 过零点预测:得出匹配波形后,通过系统时钟得出程序运行时间,通过匹配波形到零点时间减去程序运行时间即可得出零点到达时刻。其中,波形到达零点时间可由波形库波形的采样点数、采样间隔及算术平均滤波的值计算得出。

#### 4.2 实验结果

实验环境为:酷睿双核 P8700 处理器,2 G 内存的计算机,Windows7 系统,Matlab2009b 编程软件。首先采用所提算法进行取点,建立如图 9 所示的波形库,其中横轴 x、纵轴 y 分别为采样点数及一次电流值。

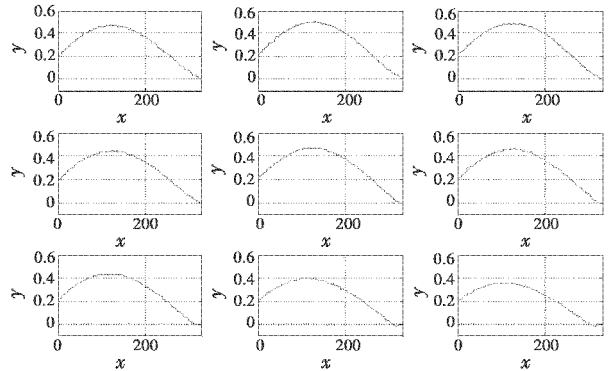


图 9 一次电流波形库

Fig. 9 Waveform database of current

由图 9 可见,各组波形非常类似,用文中给出的波形预处理与匹配的方法进行匹配后,结果如图 10 所示。其中,粗线为待匹配波形所给出采样点,细线为与其相匹配的波形库中波形,由此可以预测波形到达零点时间。

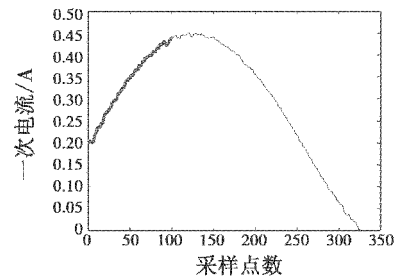


图 10 波形比对结果

Fig. 10 Result of waveform matching

实验中通过多种不同的匹配方式进行波形匹配并对计算程序运行时间进行比较,各种匹配方式耗时比较如表 1 所示。

表 1 几种匹配方法的匹配耗时及识别率对比实验  
Table 1 Several matching methods' recognition rate and time-consuming comparative experiment

方法	平均识别时间/ms	识别率/%
快速波形匹配法	10.235	93
SSDA 模板匹配法	3.343	95
改进 SSDA 匹配法	1.436	99
滤波后改进 SSDA 匹配法	0.451	99

如表 1 所示,快速波形匹配的方法进行匹配所需时间较长,SSDA 的匹配方法使时间缩短了近 2/3。使用本文所提出的改进的 SSDA 匹配方法,并且在波形库建立时采取本文所提出的预处理方法之后,匹配时间大幅降低,匹配精度并未下降。

## 5 小结

本文提出了一种通过改进 SSDA 波形匹配的方法来预测一次电流过零点,从而控制高频电源开关来提高电源的输出效率。在波形库的建立过程中采取了两次滤波,并进行了限定条件的取点,然后将图像匹配的 SSDA 算法通过阈值设定方面的改进之后用于波形的匹配过程。经过 Matlab 仿真实验表明,本文提供的方法在匹配时间上能达 0.5 ms 左右,同时由于取点方法的改进又保证了很高的匹配精度。考虑到 DSP 实时处理数据速度要比 Matlab 仿真速度快很多,因而之后工作中将考虑使用 DSP 对此方法进行硬件实现,并将研究高频电源的故障诊断和容错控制<sup>[13]</sup>等方面的内容,使之应用于高频电源工作现场。

## 参考文献

- [1] 孙广鹏,张传成,孙更生. 电除尘节能技术探讨与研究[J]. 通用机械,2009(1):77-79.
- [2] POLTL A, FROHLIEH K. A new algorithm enabling controlled short circuit interruption [J]. IEEE Trans Power Delivery, 2003, 18(3): 802-808.
- [3] THOMAS R, DAALDER J, SOLVER C E. An adaptive, self-

checking algorithm for controlled fault interruption[C]//The 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, CIRED, 2005:1-5.

- [4] CHEN C C, CHU H T. Similarity measurement between images[C]//Proceedings of the 29th Annual International Computer Software and Applications Conference, 2005:41-42.
- [5] 陈智. 图像匹配技术研究[D]. 武汉:华中师范大学, 2006.
- [6] PAN Jianjia, TANG Yuanyan, PAN Baochang. The algorithm of fast mean filtering[C]//Wavelet Analysis and Pattern Recognition, 2007:244-246.
- [7] 王科俊,熊新炎,任楨. 高效均值滤波算法[J]. 计算机应用研究, 2010(2):434-438.
- [8] LIU Haifeng, XIAO Chuangbai, DENG M, et al. A faster image registration algorithm[C]//Image and Signal Processing(CISP), 2010(10):1218-1221.
- [9] 王立新,刘彤宇,李阳. SSDA 图像匹配算法的研究及实现[J]. 光电技术应用, 2005, 20(3):53-55.
- [10] 杜杰. 两种基于灰度的快速图像匹配算法[D]. 大连:大连海事大学, 2007.
- [11] 李俊山,谭园园,张媛莉. SSDA 的改进算法[J]. 电光与控制, 2007, 14(2):66-68.
- [12] 黄文清,张福欣. 基于梯度图像的改进 SSDA 方法[J]. 电光系统, 2004(4):7-10.
- [13] 张岐龙,单甘霖,段修生,等. 基于小波支持向量机的模拟电路故障诊断[J]. 电光与控制, 2010, 17(5):66-69.

(上接第 43 页)

器,得到世界各国的重视,以美国为首的西方发达国家均在大力发展。提高滑翔弹毁伤概率成为滑翔弹改进发展的重点,由于制导律的优化作为提高滑翔弹毁伤概率<sup>[10]</sup>的重要途径,应对其进行深入研究。文中给出了基于虚拟目标的比例末制导律,该制导律在满足脱靶量的同时,可保证滑翔弹以给定的着角命中目标,最大着角超过 80°,可满足攻击不同地面目标的着角要求,且在工程上易于实现,具有较高的实用价值。

## 参考文献

- [1] 王颖,宋龙,张拥军. 制导滑翔炸弹的最优末制导律研究[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(4):51-54.
- [2] 范金荣. 制导炸弹发展综述[J]. 现代防御技术, 2004, 32(3):27-31.
- [3] 吴盘龙,杜国平,薄煜明. 空地制导弹药的 MIMU/GPS 组

合导航系统研究[J]. 电光与控制, 2008, 15(10):65-68.

- [4] 周义,王自焰,郁青安. 美军机载精确制导炸弹发展趋势[J]. 飞航导弹, 2003(5):26-29.
- [5] 张功,李帆,万聪梅,等. 三维空间内导弹弹着角可控制导律[J]. 飞行力学, 2010, 28(1):65-68.
- [6] 顾文锦,赵红超. 基于虚拟目标的反舰导弹的最优制导律研究[J]. 现代防御技术, 2006, 34(4):56-60.
- [7] 方振平,陈万春,张曙光. 航空飞行器飞行动力学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2005.
- [8] 赵红超,顾文锦,于进勇. 三维虚拟目标比例导引律研究[C]//飞行力学与飞行试验专业分论坛暨第十九界学术交流会议文集, 2003.
- [9] 吴盘龙. 防区外空面导弹制导系统关键技术研究[D]. 西安:西北工业大学, 2005.
- [10] 程江涛,王超勇,谢振华. 空对舰导弹目标毁伤概率的研究[J]. 电光与控制, 2001, 8(1):43-45.