

考虑群延迟和暂态时延的短窗低通滤波器设计

刘益青¹, 高伟聪², 魏欣³, 王秀广³

(1. 济南大学 自动化与电气工程学院, 山东 济南 250022;

2. 山东外事翻译职业学院 信息工程学院, 山东 威海 264504; 3. 积成电子股份有限公司, 山东 济南 250100)

摘要:为采用基于采样值和正弦信号模型的快速保护算法,并防止重采样环节的频率混叠,智能变电站的数字化保护需要数字低通滤波器配合。提出一种基于 Tukey 窗函数,并且同时考虑滤波器幅频特性和群延迟、暂态时延的低通滤波器设计方法。该方法首先确定窗函数时域宽度 T_c 和截止频率 f_c ,再根据采样频率 f_s 和固定不变的 f_c ,确定滤波器的长度 $N \leq 2f_s/f_c$,最后根据 N 和 f_c 得到完整的滤波器系数。通过理论分析、数字仿真和静态实验,研究了所设计滤波器的幅频特性、群延迟和暂态时延。对采用所设计滤波器的母线保护进行 RTDS 实验,通过对比表明,按所提方法设计的滤波器在群延迟和暂态时延性能上明显优于传统窗函数法设计的滤波器,降低了滤波器环节对保护速动性的影响。

关键词:智能变电站;Tukey 窗函数;低通数字滤波器;群延迟;暂态时延

中图分类号:TM 77

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.11.004

0 引言

低通滤波器广泛应用于数字化保护^[1],按实现形式可分为模拟低通滤波器和数字低通滤波器。模拟低通滤波器多用于抗混叠滤波^[2],根据香农采样定理,采样频率要大于模拟信号中最高频率的 2 倍,因此需要对模拟信号的频带进行限制,称为抗混叠滤波。抗混叠滤波的截止频率应与 AD 转换的采样频率相适应,一般远高于基频。数字低通滤波器常用于以下方面。

a. 与正弦信号模型算法相配合。正弦信号模型算法相比周期函数模型算法,所需数据窗较短^[3],为提高精度需要与数字带通或低通滤波器配合,例如小矢量算法^[4]、半周积分算法^[5]和三采样值算法^[6]等。

b. 与采样值判据的保护算法相配合。采样值差动保护^[7]和基于微分方程的线路距离保护^[8]需要数字低通滤波器滤除高频分量,以减小高次谐波的影响。

c. 与智能变电站数字化保护的重采样环节配合。保护要对合并单元发来的采样值降采样^[9],并通过插值进行数据同步^[10],为防止插值、抽取过程的频率混叠,需要数字低通滤波器限制原始信号频带。

数字低通滤波器的应用增加了整个保护系统的动作时间,而合并单元、智能终端也会增加额外延时。出于维持电网稳定性的考虑,对智能变电站保护的速动性、可靠性提出了更高要求^[11-12]。具体到

低通滤波器的设计,应综合考虑幅频特性、群延迟和暂态时延等方面^[13]。

利用辅助设计工具可以直接得到 IIR 型数字低通滤波器,但是继电保护要求滤波算法具有绝对的稳定性,其应用受到限制。

文献[14]基于约束最小二乘法设计了一种用于重采样的数字低通滤波器,虽然与传统切比雪夫逼近原理的滤波器相比,减小了滤波器的群延迟,但是滤波器长度仍然较大。文献[15]基于神经网络法设计了适用于差动保护的重采样低通滤波器,从频域入手设计的滤波器具有任意频率特性,并考虑了对采集环节造成的差动电流误差进行补偿,但是滤波器长度大于 1 个基波周期,影响暂态时延特性。

目前数字化保护的数字低通滤波器设计方法较难协调滤波效果和响应速度之间的矛盾。本文以常用的 Tukey 窗函数为基础,研究了 2 种实用化的 FIR 型数字低通滤波器设计方法;第 1 种设计方法为传统窗函数法;第 2 种设计方法同时考虑了低通滤波器的幅频特性、群延迟和暂态时延特性,该方法可得到截止频率和低通滤波器长度可以任意设置的短窗低通滤波器,且暂态时延较小。本文所设计的低通滤波器适用于接入模拟量采集合并单元的全数字化保护装置,并在保护装置内部接收到采样值数据后进行滤波处理的场合。

1 基于 Tukey 窗函数的低通滤波器设计

1.1 Tukey 窗函数的时域和频域表示

本文以数字化保护中常用的 Tukey 窗为例进行说明,但是本文的设计方法同样适用于其他窗函数。Tukey 窗函数的时域和频域表达式分别如式(1)、(2)所示。

收稿日期:2017-10-15;修回日期:2018-08-17

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2018MEE039)
Project supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province(ZR2018MEE039)

$$h(t) = \begin{cases} 0.5[1 + \cos(\pi t/T_c)] & |t| \leq T_c \\ 0 & |t| > T_c \end{cases} \quad (1)$$

$$H(f) = \frac{\pi^2 \sin(2\pi f/f_c)}{2\pi f[\pi^2 - (2\pi f/f_c)^2]} \quad (2)$$

其中, T_c 为 Tukey 窗的时域宽度; $f_c = 1/T_c$ 。

Tukey 窗函数的时域、频域波形分别如图 1(a)、(b)所示,图中同时将矩形窗函数的时域、频域波形一并绘出,以作对比。

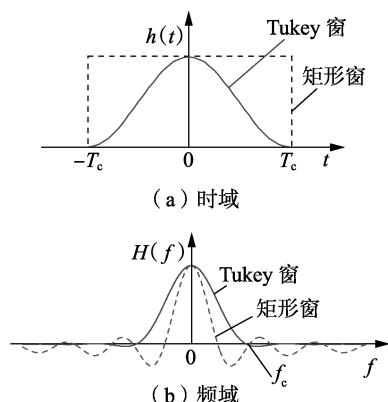


图 1 Tukey 窗函数的时域和频域表示

Fig.1 Time-domain and frequency-domain representation of Tukey-window function

由图 1(b)可知,当 $f > f_c$ 时,幅频响应已经大幅衰减,定义 f_c 为低通滤波器的截止频率,高于 f_c 的频率分量可以视为完全滤除。

1.2 短窗低通滤波器设计

物理可实现低通滤波器应为因果系统,将式(1)时移 $T_c/2$,将窗函数移至时间轴右侧,并将 $f_c = 1/T_c$ 代入式(1),可得:

$$h(t) = \begin{cases} 0.5[1 + \cos(\pi f_c t - \pi)] & 0 \leq t \leq \frac{2}{f_c} \\ 0 & t > \frac{2}{f_c} \end{cases} \quad (3)$$

对已知的模拟低通滤波器单位冲激响应 $h_a(t)$ 进行采样,可得到对应的数字低通滤波器单位冲激响应序列 $h(n)$,即:

$$h(n) = h_a(nT_s) \quad (4)$$

将式(3)视为模拟低通滤波器的冲激响应 $h_a(t)$,采样后得数字低通滤波器单位冲激响应序列 $h(n)$ 为:

$$h(n) = \begin{cases} 0.5[1 + \cos(\pi f_c nT_s - \pi)] = \\ 0.5 + 0.5\cos\pi\left(\frac{f_c}{f_s}n - 1\right) & 0 \leq n \leq 2f_s/f_c \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

其中, T_s 为采样时间间隔; f_s 为采样频率,且有 $f_s =$

$1/T_s$ 。

基于 Tukey 窗函数的低通滤波器的设计可以采用以下 2 种方法。

a. 方法 1: 在固定的采样频率 f_s 下,根据所要求的最大时延,先确定低通滤波器的长度 N ,再由 $N = 2f_s/f_c$ 确定截止频率 f_c 。

令合并单元采样率 $f_s = 4\,000$ Hz,即 80 点/周期,则 N 分别取 80、40、20、10 时,按方法 1 设计得到的系列低通滤波器参数列于表 1。

表 1 根据方法 1 设计的低通滤波器参数

Table 1 Parameters of low-pass filter designed by Method 1

序号	f_s/Hz	N	低通滤波器 时窗/ms	f_s/f_c	f_c/Hz
F80-1	4 000	80	20.0	40	100
F80-2	4 000	40	10.0	20	200
F80-3	4 000	20	5.0	10	400
F80-4	4 000	10	2.5	5	800

方法 1 属于传统的窗函数法,其完整地利用了 Tukey 窗函数,能保证较好的幅频特性。但是随着低通滤波器长度的缩短,截止频率会有较大的变化,过渡带加宽,滤除高次谐波的能力下降。

b. 方法 2: 在固定的采样频率 f_s 下,先给定截止频率 f_c ,并取低通滤波器长度 $N \leq 2f_s/f_c$ 。这样得到的低通滤波器在给定截止频率下的暂态时延较短,但是其冲激响应并不是完整的 Tukey 窗函数,因此不能完全滤除频域大于 f_c 的高次谐波,过渡带也将加宽。

仍以 $f_s = 4\,000$ Hz 为例, N 分别取 80、40、20、10 时,按方法 2 设计得到的系列低通滤波器参数列于表 2。

表 2 根据方法 2 设计的低通滤波器参数

Table 2 Parameters of low-pass filter designed by Method 2

序号	f_s/Hz	N	低通滤波器 时窗/ms	f_s/f_c	f_c/Hz
S80-1	4 000	80	20.0	40	100
S80-2	4 000	40	10.0	40	100
S80-3	4 000	20	5.0	40	100
S80-4	4 000	10	2.5	40	100

对方法 1、2 进行比较。

a. 方法 1 首先给定低通滤波器长度 N ,再确定截止频率 f_c ;而方法 2 先给定截止频率 f_c ,再选择所需要的低通滤波器长度。

b. 方法 1 中截止频率 f_c 不固定,随低通滤波器长度而变化;方法 2 中截止频率 f_c 固定,不随低通滤波器长度变化。

1.3 短窗低通滤波器的频率特性

按照 1.2 节中的 2 种设计方法,可得到表 1、2 中各低通滤波器的系数,分别如图 2(a)、(b)所示。由图可见,按照方法 1 设计的低通滤波器系数是整个

Tukey 窗函数,而按照方法 2 设计的低通滤波器系数只利用了部分 Tukey 窗函数。

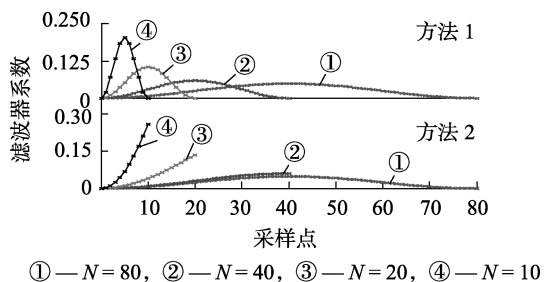


图 2 低通滤波器系数

Fig.2 Coefficients of low-pass filters

图 3 给出了按照 2 种设计方法得到的低通滤波器的幅频和相频响应特性曲线。

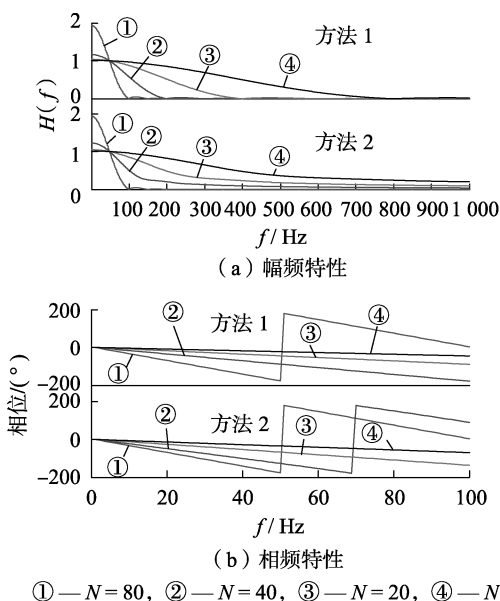


图 3 低通滤波器的频率响应特性曲线

Fig.3 Frequency response curves of low-pass filters

由图 2、3 可知,当 $N=80$,即 1 个周期内时,按照 2 种方法设计的低通滤波器特性完全一致;而当 $N=40, 20, 10$ 时,按照 2 种方法设计的低通滤波器差别较大,具体如下。

a. 按照方法 1 设计的低通滤波器系数偶对称,满足线性相位条件,相频特性为严格的线性关系;幅频特性呈梳状,对某些整数次谐波衰减为 0;低通滤波器长度越长,过渡带越陡峭;

b. 按照方法 2 设计的低通滤波器系数不具有对称性,不满足线性相位条件;但是由图 3(b)可知,在低频段(0~100 Hz)该低通滤波器的相频特性呈近似线性关系;幅频特性呈单调下降形式,不存在幅频响应为 0 的频率点。

2 群延迟和暂态时延的分析与仿真

2.1 群延迟和暂态时延概念

滤波器群延迟的定义为^[16]:

$$\tau_g = -\frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} \quad (6)$$

其中, ω 为数字角频率; $\varphi(\omega)$ 为滤波器的相频响应函数。

群延迟 τ_g 反映了输出信号包络线的延迟,即低通滤波器的稳态输出延迟。若滤波器的单位冲激响应序列 $h(n)$ 中,非零元素个数为 M ,则对于具有线性相位的滤波器,其群延迟 $\tau_g = (M-1)/2$ 。

由群延迟的定义可知,群延迟仅能表征低通滤波器在稳态情况下的性能。对应于快速保护的滤波器而言,需要更加确切的反映暂态响应的指标,因此定义低通滤波器的暂态时延 T_d 为从输入信号发生跃变到获得稳定低通滤波器输出之间的时间延迟。在 T_d 时间内滤波器输出处于动态变化过程中。由文献[1]的分析可知 T_d 与信号的初相位有关,即输入滤波器的正弦信号初相位不同,得到的 T_d 也不同;且 T_d 在一定范围内变化,最长不超过 $(M-1)T_s$,这也可由 2.2 节的仿真结果验证。

2.2 Tukey 窗低通滤波器的群延迟和暂态时延

综合考虑低通滤波器幅频特性和低通滤波器长度,选择 $N=20$,重点分析 F80-3 和 S80-3 这 2 种低通滤波器的群延迟和暂态时延性能。

根据群延迟定义,F80-3 低通滤波器具有线性相位,群延迟 $\tau_g = 10$ 。由于 $T_s = 0.25$ ms,则群延迟换算成时间为 2.25 ms。S80-3 低通滤波器不具有线性相位,其群延迟不能按照 2.1 节中的方法进行估算。假设在第 80 个采样点突然施加式(7)所示的信号。

$$x(t) = 1.0 \times \sin(2\pi ft + \varphi_0) \quad (7)$$

其中, $f=50$ Hz; φ_0 为初相角,取值为 0 或 $\pi/2$ 。

在式(7)所示的输入信号下,F80-3 和 S80-3 低通滤波器的群延迟及暂态时延的仿真结果如图 4 所示。

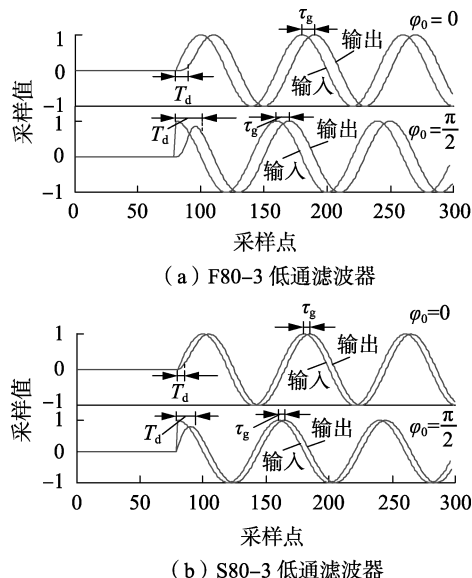


图 4 低通滤波器的群延迟和暂态时延

Fig.4 Group delay and transient delay of low-pass filters

图 4 中的群延迟和暂态时延的测量结果列于表 3 中。其中,群延迟 τ_g 是通过测量稳态时输出与输入波形相邻波峰之间的采样点数得到;暂态时延 T_d 的测量是通过在输入信号突变后,寻找输出与输入波形有相同采样值且间隔恰为 τ_g 的时刻,该时刻与突变时刻的时间差即为 T_d 。

表 3 低通滤波器的群延迟和暂态时延测量值

Table 3 Measured values of group delay and transient delay of low-pass filters

低通滤波器	N	φ_0/rad	τ_g		T_d	
			采样点	换算至时间/ms	采样点	测量值/ms
F80-3	20	0	10	2.25	15	3.50
		$\pi/2$	10	2.25	19	4.50
S80-3	20	0	5	1.00	6	1.25
		$\pi/2$	5	1.00	13	3.00

表 3 的测量结果表明,群延迟 τ_g 反映的是稳态情况下的输出相对于输入波形的相位或时间延迟,与输入信号初相位无关。F80-3 低通滤波器的 $\tau_g = 10$ (或 $\tau_g = 2.25 \text{ ms}$),与理论计算值一致。S80-3 低通滤波器 $\tau_g = 5$ (或 $\tau_g = 1.00 \text{ ms}$),小于 F80-3 低通滤波器的 τ_g 。

暂态时延 T_d 的情况稍复杂,按照前文 T_d 的定义,理论上计算存在一定的困难。为比较按照 2 种方法设计的低通滤波器的暂态时延,采取如下穷举法进行验证:取输入信号的初相位 $\varphi_0 \in [0, 2\pi)$,步长为 0.1 rad ,记录所有初相位情况下 T_d 的最大、最小值,则 $\varphi_0 = 0$ 对应 T_d 的最小值, $\varphi_0 = \pi/2$ 、 $\varphi_0 = 3\pi/2$ 对应 T_d 的最大值。分析记录的数据可得,对于不同初相位的输入信号, F80-3 低通滤波器的暂态时延范围为 $3.50 \text{ ms} \leq T_d \leq 4.50 \text{ ms}$, S80-3 低通滤波器的暂态时延范围为 $1.25 \text{ ms} \leq T_d \leq 3.00 \text{ ms}$ 。由此可见,在相同的数据窗长条件下,按照方法 2 设计的低通滤波器暂态时延要短于按照方法 1 设计的低通滤波器。

实际上, T_d 中也包含了 τ_g 的影响,但对于数字化保护而言,仅考察 τ_g 的影响是不够的。当发生故障时,输入保护的电压、电流会发生突变,只有经历了 T_d 后,低通滤波器的输出才能完全反映故障电压、电流。因此低通滤波器的 T_d 更加直接地影响着保护的速动性。从这个角度而言, S80-3 低通滤波器更具优越性,但是 T_d 的减小是以降低滤除高次谐波性能和损失线性相位为代价的。

由图 3(a) 可知,对于 200 Hz 及以下的频率成分, F80-3 与 S80-3 低通滤波器的滤除效果相差不大,但是对于 300 Hz 以上的频率成分, S80-3 低通滤波器的滤除效果要稍差一些。而发生故障时 300 Hz 以上的高频成分含量远低于基波分量。另外,由于后续保护算法主要利用的是基波分量,所以线性相位问题并不十分突出。

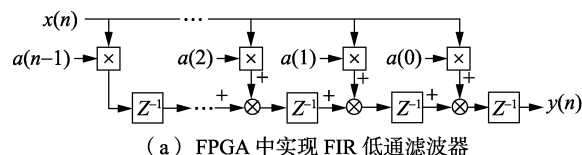
3 低通滤波器实现及实验验证

在智能站母线保护装置中,利用 Xilinx 的 Spartan6 系列现场可编程门阵列 (FPGA) 芯片实现所设计的低通滤波器,并通过静态实验和 RTDS 实验进行验证。

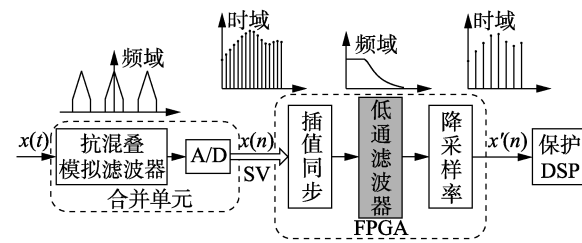
3.1 基于 FPGA 的低通滤波器实现

Xilinx 提供了实现 FIR 低通滤波器的通用功能“IP Core”,本文采用如图 5(a) 所示的“转置乘加器”结构。图中, $a(0)$ 、 $a(1)$ 、 $a(2)$ 、 $\dots$ 、 $a(n-1)$ 为低通滤波器系数; $x(n)$ 、 $y(n)$ 分别为采样值输入和低通滤波器输出; Z^{-1} 为延时环节。

图 5(b) 中的阴影模块即为所设计的低通滤波器在智能站母线保护装置中的位置。图中, FPGA 和保护数字信号处理器 (DSP) 均位于母线保护装置内部,合并单元为单独的物理设备;合并单元与母线保护之间采用符合 IEC61850-9-2 标准的采样值数据传输。母线保护接收到合并单元发出的采样值序列后,首先根据额定延时进行数据同步,再经数字低通滤波器限制信号频带,最后进行降采样率变换。除了防止降采样抽取时的频率混叠外,低通数字滤波器还与反映基波分量的快速保护算法相配合。



(a) FPGA 中实现 FIR 低通滤波器



(b) 保护装置中的低通滤波器环节

图 5 低通滤波器在保护装置中的实现

Fig.5 Implementation of low-pass filters in protection device

合并单元虽然包含了抗混叠模拟低通滤波器,但是为了保证谐波测量精度,其截止频率往往很高,例如对于 80 点/周期 采样的合并单元,抗混叠低通滤波器的截止频率一般为 $12 \sim 16 \text{ kHz}$,远高于工频。因此必须在保护装置内部进行进一步的滤波处理。

3.2 静态实验分析

为验证所设计的低通滤波器性能,利用数字化保护实验仪,以 IEC61850-9-2 的方式施加式 (8) 所示的典型故障电流,其包含最高 13 次谐波。

$$i(t) = \sum_{h=1}^{13} \sqrt{2} I_h \sin(2\pi h f_1 t + \varphi_h) \quad (8)$$

其中, f_1 为基波频率; h 为谐波次数; I_h 为电流有效值; φ_h 为初相角。

测试过程中,基波有效值固定取为 1 A,依次施加各次谐波(初始谐波含量为 10%和 20%),对经低通滤波器后的输出数据如表 4 所示。表中, c_{h0} 为初始谐波含量。

表 4 滤除高次谐波的测试结果

Table 4 Testing results of eliminating high-order harmonics

谐波次数	F80-3 滤波后输出/%		S80-3 滤波后输出/%	
	$c_{h0} = 10\%$	$c_{h0} = 20\%$	$c_{h0} = 10\%$	$c_{h0} = 20\%$
2	9.60	16.85	9.34	16.40
3	7.04	14.15	6.63	13.33
4	4.97	10.32	4.69	9.73
5	3.45	6.84	3.75	7.20
6	1.74	3.51	2.94	5.92
7	0.67	1.27	2.73	5.16
8	0	0	2.46	4.60
9	0.27	0.53	2.12	4.20
10	0.23	0.49	1.69	3.59
11	0.13	0.27	1.66	3.55
12	0	0	1.59	3.04
13	0.01	0.15	1.37	2.90

由表 4 可见,实测结果与低通滤波器幅频特性的理论分析相一致。在基波上叠加某次谐波时,通过低通滤波器后谐波含量会出现幅值衰减。对于 7 次及以上的谐波,F80-3 低通滤波器基本上可以完全滤除,S80-3 低通滤波器的滤波效果稍差。对于 5 次以下谐波,F80-3 与 S80-3 的滤波效果相差不大。

对低通滤波器的暂态时延对保护速动性的影响进行测试:对于母线保护,施加 2 倍差动电流定值(初相角为变化范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$,步长为 2°)和 50% 电压闭锁定值,记录保护面向通用对象的变电站事件(GOOSE)出口时间。对比无低通滤波器、2 阶 IIR 低通滤波器、F80-3 和 S80-3 低通滤波器对保护动作时间的影响,结果列于表 5。

表 5 低通滤波器对保护动作时间的影响

Table 5 Influence of low-pass filter on operation time of protection

滤波器	保护动作时间/ms			
	最大值	最小值	平均值	标准差
无低通滤波器	12.7	11.5	12.05	0.371
2 阶 IIR	13.1	11.9	12.50	0.367
F80-3	14.8	13.4	13.92	0.508
S80-3	14.1	12.3	13.01	0.614

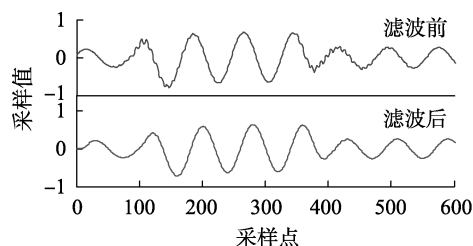
实验结果表明,参照文献[1]设计的 2 阶 IIR 低通滤波器与无低通滤波器的动作时间相近,但是 IIR 低通滤波器存在稳定性问题,使用应谨慎。F80-3 或 S80-3 低通滤波器的动作时间均有延迟,二者相比较,S80-3 的动作延时较小,但离散度较大。

由表 5 的测试结果可以看出,采用 S80-3 低通滤波器后给保护动作带来的延迟很小。实测的动作延时与表 3 给出的低通滤波器暂态时延结果相比均偏小,这与施加的差动电流远大于动作定值有关。

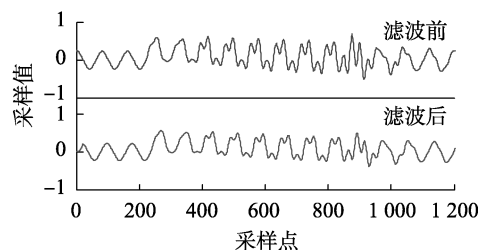
3.3 RTDS 实验验证

建立如附录中图 A1 所示的母线保护 RTDS 实验系统进行样机测试,并对测试数据和结果进行分析。

图 6(a)给出了区内点 K_1 发生金属性故障时,故障录波器录取的 BK_2 处电流波形,作为对比,给出了经过 S80-3 低通滤波器后的输出采样值波形。可以看出,经过低通滤波器后,原始故障电流中含有的高次谐波已经大幅衰减。



(a) 区内金属性故障



(b) 区外故障

图 6 滤波前、后的故障电流对比

Fig.6 Comparison of fault currents between before and after filtering

为考察较低次谐波的影响,改变 RTDS 模型中线路 L_1 的参数,使得在区外点 K_6 发生故障时, BK_2 处电流中包含 30%~60%的 3 次、5 次谐波。图 6(b)给出了滤波前、后的故障波形对比,由图可见,S80-3 低通滤波器滤除较低次谐波时的效果稍差,这与表 4 的静态实验的结果相一致。

在 RTDS 系统中测试发生区内、外金属性故障时,采样值差动判据(采用 10 取 8 和 24 取 20 判据)满足的 GOOSE 信号时间,测试结果列于表 6。

对测试过程和表 6 的测试结果进行分析可以得到以下结论:

a. 发生区内金属性故障时,故障电流较大,在无低通滤波器的情况下,动作速度较快,加入低通滤波器会使保护动作延迟;

b. 改变模型参数,增大故障电流中谐波含量,无低通滤波的动作延时也会相应增加,此时与加入低通滤波器后的动作时间相差不大,如图 6(b)所示;

c. 对于区外故障,带低通滤波器时,采样值差动 10 取 8 和 24 取 20 判据均不满足,而无低通滤波器时,10 取 8 判据在图 6(b)所示的情况中,会出现个别满足的情况,如表 6 中括号内的动作时间所示。

表 6 采样值差动判据测试结果

Table 6 Testing results of sampling value differential criteria

故障		动作时间/ms		
		无低通滤波器	F80-3 低通滤波器	S80-3 低通滤波器
点 K_1 区内故障	AG	[12.2, 17.8]	[14.1, 19.5]	[13.4, 18.5]
	BG	[11.9, 16.9]	[13.9, 19.0]	[12.9, 17.8]
	AB	[12.7, 18.1]	[14.2, 19.4]	[13.5, 19.0]
	CA	[12.5, 18.1]	[14.3, 19.2]	[13.3, 18.7]
	BCG	[12.3, 17.4]	[14.5, 18.9]	[13.1, 17.9]
	ABC	[12.1, 16.8]	[13.9, 18.6]	[12.9, 18.0]
点 K_4 区外故障	AG	(16.4)	—	—
	BG	—	—	—
	AB	—	—	—
	CA	—	—	—
	BCG	(24.4)	—	—
	ABC	—	—	—

注:括号内数据对应采样值差动 10 取 8 判据,其他数据对应 24 取 20 判据。

综上所述,对于区内金属性故障,低通滤波器会使保护动作延迟;对于谐波含量较高的外部故障,低通滤波器会提高保护速动性和可靠性。

4 结论

智能变电站数字化保护需要采用性能优良的数字低通滤波器与数据预处理和快速保护算法相配合。本文以 Tukey 窗函数为基础,研究了 2 种实用化的低通滤波器设计方法。其中方法 1 属于传统的 FIR 低通滤波器窗函数设计方法;方法 2 为改进的设计方法,首先选择并固定截止频率,再确定低通滤波器长度。

对按照 2 种方法设计的低通滤波器进行了幅频、相频响应和群延迟的理论分析,并对暂态时延进行了对比验证。验证结果表明:相比方法 1,按照方法 2 设计的低通滤波器具有较小的群延迟和暂态时延,且其不要求全站保护采用完全相同的滤波环节,也不会给数字化保护的其他环节带来改变和风险。最后通过 RTDS 实验进一步验证了按照方法 2 设计的低通滤波器在母线保护装置中应用的可行性和有效性。该母线保护装置已经成功应用于现场多年,效果良好。

由于按照暂态时延的定义进行严格的理论计算较困难,本文仅穷举对比了所讨论的 2 种方法设计的低通滤波器暂态时延,虽能满足工程设计需要,但进一步的工作应从理论上严格计算出暂态时延开展。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 陈德树. 计算机继电保护原理与技术[M]. 北京:中国电力出版社,1992:29.
- [2] SUKUMAR M B, PHILLIP L D L, RAJESH G K. Investigating the option of removing the antialiasing filter from digital relays[J].

IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4):1864-1868.

- [3] 张波,何奔腾,王慧芳,等. 基于正余弦滤波器对的相量算法[J]. 电力系统自动化,2013,37(19):86-92.
ZHANG Bo, HE Benteng, WANG Huifang, et al. Phasor algorithm based on sine and cosine filters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(19):86-92.
- [4] 邓祥力,王传启,张哲,等. 基于小矢量技术的快速差动电流速断保护[J]. 电力系统自动化,2012,36(14):67-71.
DENG Xiangli, WANG Chuanqi, ZHANG Zhe, et al. Fast differential current instantaneous trip protection based on phaselet algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14):67-71.
- [5] 王明磊,常湧. 半周积分算法的几种改进算法[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(11):66-69.
WANG Minglei, CHANG Yong. Some new algorithms of the half-cycle integral algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11):66-69.
- [6] WANG Liancheng. Frequency responses of phasor-based microprocessor relaying algorithms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(1):98-109.
- [7] 杨经超,尹项根,陈德树,等. 采样值差动保护动作特性的研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(9):49-57.
YANG Jingchao, YIN Xianggen, CHEN Deshu, et al. Study on the operating characteristic of sampled value differential protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9):49-57.
- [8] 张保会,张金华,原博,等. 风电接入对继电保护的影响(六):风电场送出线路距离保护影响分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):1-6.
ZHANG Baohui, ZHANG Jinhua, YUAN Bo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection(6):analysis of distance protection for wind farm outgoing transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6):1-6.
- [9] 刘益青,高伟聪,高厚磊,等. 适用于智能变电站混合数据源接入的保护同步采样方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(11):158-164.
LIU Yiqing, GAO Weicong, GAO Houlei, et al. Synchronous data acquisition from hybrid sources for smart substation protections[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11):158-164.
- [10] 佟为明,高吉星,金显吉,等. 智能变电站过程层网络报文传输时间计算及抖动抑制方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(6):131-137.
TONG Weiming, GAO Jixing, JIN Xianji, et al. Calculation and jitter suppression of process level network message transmission time for smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6):131-137.
- [11] 李仲青,周泽昕,黄毅,等. 数字化变电站继电保护适应性研究[J]. 电网技术,2011,35(5):210-215.
LI Zhongqing, ZHOU Zexin, HUANG Yi, et al. Research on applicability of relay protection in digital substations[J]. Power System Technology, 2011, 35(5):210-215.
- [12] DAVID M E I, PASCAL S, RICHARD R T, et al. System-level tests of transformer differential protection using an IEC61850 process bus[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(3):1382-1389.
- [13] KUMAR A B S. Time delay compensation for high speed digital protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1986, PER-6(4):68-73.
- [14] 朱超,梅军,王椿丰,等. 基于低延迟有限冲激响应滤波器的差动保护采样率转换算法[J]. 电工技术学报,2013,28(10):241-

248,319.

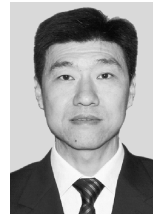
ZHU Chao, MEI Jun, WANG Chunfeng, et al. FIR filter with reduced group delay based a sampling frequency conversion algorithm for differential protection [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 241-248, 319.

- [15] 陆金凤, 陆于平, 张冲. 神经网络法设计的差动保护重采样低通滤波器[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 102-106.

LU Jinfeng, LU Yuping, ZHANG Chong. A re-sampling low-pass filter for differential protection designed with artificial neural network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 102-106.

- [16] 胡广书. 数字信号处理: 理论、算法与实现[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2003: 219.

作者简介:



刘益青

刘益青(1977—),男,山东潍坊人,副教授,高级工程师,博士,通信作者,研究方向为电力系统继电保护(E-mail: cse_liuyq@ujn.edu.cn);

高伟聪(1977—),女,河北石家庄人,副教授,硕士,研究方向为嵌入式技术在电力系统中的应用;

魏欣(1980—),男,山东济宁人,高级工程师,研究方向为电力系统继电保护。

Design of short-window low-pass filter considering group delay and transient delay

LIU Yiqing¹, GAO Weicong², WEI Xin³, WANG Xiuguang³

(1. School of Electrical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China;

2. Shandong Vocational College of Foreign Affairs Translation, School of Information Engineering, Weihai 264504, China;

3. Integrated Electronic Systems Lab Co., Ltd., Jinan 250100, China)

Abstract: The digital relays in smart substations need the assistance of low-pass digital filters in order to adopt fast algorithms based on sampling values and sine signal models and avoid the frequency aliasing during resampling. A design method of low-pass filter based on Tukey-window function is proposed, which simultaneously considers the amplitude-frequency characteristic, group delay and transient delay. Firstly, the time-domain width T_c and cutoff frequency f_c of window function are determined, then the filter length N is determined to be less than or equal to $2f_s/f_c$ according to the sampling frequency f_s and the fixed f_c , finally the complete filter coefficients can be obtained by N and f_c . The amplitude-frequency characteristics, group delay and transient delay of the designed filter are studied through theoretical analysis, digital simulation and static experiment. The RTDS experiment of a busbar protection adopting the designed filter shows that the designed filter is obviously superior to the filter designed by the traditional window function method in the aspects of group delay and transient delay, and the designed filters can effectively reduce the influence of filters on the speed of protection.

Key words: smart substation; Tukey-window function; low-pass digital filter; group delay; transient delay

(上接第 20 页 continued from page 20)

Optimal control strategy of ice storage air conditioning under flexible load virtual power plant

MI Zengqiang, ZHANG Wenyan, JIA Yulong

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In the process of building a safe, stable, economical and low-carbon smart grid, it has attracted high attention to use the flexible loads for active participating in the coordinated control of power grid. In order to exploit and utilize the regulation potential of flexible loads, a framework of virtual power plant specially designed for flexible loads is proposed. The ice storage air conditioning is selected as a typical controlled object, and an optimal control strategy of power consumption is proposed, which gives priority to users' experience and economy, and considers the supply and demand relation of power grid. A two-layer optimal model is built according to the actual operation characteristics of air conditioning system and user expectation of power consumption, which takes the minimum operation cost and optimal load fluctuation as its objectives. The control of ice storage air conditioning under different cold load requirements is simulated and compared by cases, which verifies the feasibility and effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: flexible load; virtual power plant; ice storage air conditioning; control strategy

附录

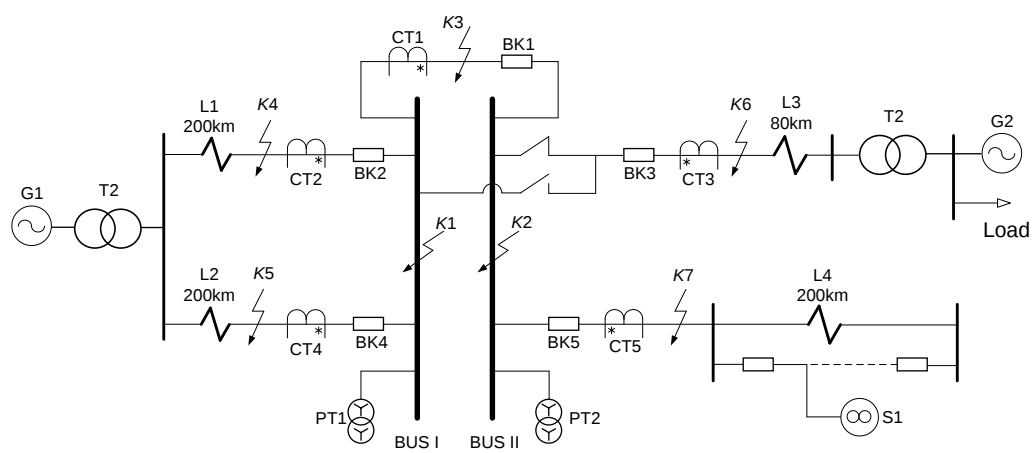


图 A1 RTDS 实验系统
Fig.A1 RTDS simulation system