

高次谐波对测控装置测量影响 解决方案设计与实现

朱何荣 王 敏 孙颂林 朱英魁 陈桂友

(南京南瑞继保电气有限公司, 南京 211102)

摘要 为解决高次谐波引起的频谱混叠, 测控装置一般会在采样前端增加低通滤波器, 本文针对测控装置采用低通滤波器引起的 2~15 次谐波衰减问题, 以及传统的固定补偿方式在频率偏差情况下的局限性, 设计了频率自相关补偿算法, 根据实际计算频率进行幅值和相位的实时补偿, 从而保证了电压电流功率有效值以及 15 次及以下谐波计算的精度。同时, 针对高次谐波对频率计算的影响, 设计了旋转向量频率测量方法, 有效解决了谐波存在导致频率计算误差较大的问题。经过测试以及现场实际应用, 证明了改进方案的有效性。

关键词: 测控装置; 低通滤波器; 频谱混叠; 频率自相关; 幅值补偿

Solution Design and Implementation for BCU Measurement Effected by High Harmonics

Zhu Herong Wang Min Sun Songlin Zhu Yingkui Chen Guiyou

(NR Electric Co., Ltd, Nanjing 211102)

Abstract In order to solve the problem of spectrum aliasing caused by high harmonics, the low-pass filter (LPF) is used by the bay control unit (BCU) before sampling in general. In view of the attenuation of 2~15 times harmonics caused by the low pass filter, and the limitation of fixed compensation method, a frequency autocorrelation compensation algorithm is designed in this paper, in order to ensure the measurement precision, the real-time compensation coefficient of the amplitude and phase is calculated according to the practical frequency calculation, at the same time, in view of the high harmonics influence on frequency calculation, a rotation vector frequency measurement method is designed in this paper, increases the precision of frequency calculation effectively., the effectiveness of the improved scheme is proved through test and actual application.

Keywords: BCU; LPF; spectrum aliasing; frequency autocorrelation; amplitude compensation

随着直流输电系统的大量建设, 各种电力电子、大容量整流、变频电器等设备广泛应用, 导致系统中出现多种谐波源^[1]。同时, 新能源并网发电迅速增长, 风力发电和光伏发电并网系统均会配有电力电子装置, 也会产生一定的谐波^[2]。

测控装置作为变电站自动化系统的测量与采集终端, 主要功能是实现电力系统运行状态的采集与一次设备的防误闭锁与运行控制^[3]。在数据采集的过程中, 根据采样定理, 要求采样频率至少高于实际信号最高频率的两倍^[4], 否则就会出现频谱混叠的情况。

电力电子设备应用引入高次谐波, 导致测控装置采样频率不满足采样定理要求, 从而引起频谱混叠, 最终导致测量结果数据精度下降, 甚至不满足标准对测控装置测量精度要求。针对此问题, 测控装置一般采用低通滤波器, 在模数转换前端先对高次谐波进行抑制, 再根据低通滤波参数对低通滤波引起的低次谐波幅值及相角偏差进行补偿。

本文针对测控装置采用低通滤波器引起的 2~15 次谐波衰减问题, 以及传统的固定补偿方式在频率偏差情况下的局限性, 设计了一种频率自相关补偿算法, 该算法依据低通滤波器参数形成 15 次及以

下各次电压电流幅值及相角初始补偿系数表，测控装置运行过程中，通过计算得到的基波频率结果，实时调整补偿系数，从而保证了电压电流以及功率的测量精度。同时，针对电网中高次谐波的存在造成频率计算精度下降的问题，设计了旋转向量频率计算方法。该算法大幅提高了电网电压谐波干扰下的频率计算精度，从而为低通补偿系数的准确计算提供了保证。

测试结果及实际运行情况证明，经过本文提供的方案改进后的测控装置，在电网高频谐波含量符合《GB/T 14549—1993 公用电网谐波》^[5]要求的情况下，电压电流以及功率的测量精度完全满足《GB/T 13729—2002 远动终端设备》标准的要求。

1 高频谐波影响

目前，直流输电系统换流站一般采用 6 脉动换流器或者 12 脉动换流器，相应的会在交流输电系统侧产生 $6k \pm 1$ 或者 $12k \pm 1$ 次的谐波^[6]。以南方电网某 500kV 直流换流站为例，现场采用的换流器为 12 脉动阀（两个 6 脉动阀串联），因此交流输电侧含有大量的 $12k \pm 1$ 次电压特征谐波^[7]。通过录波装置分析，电网中各次谐波电压含量如图 1 所示。

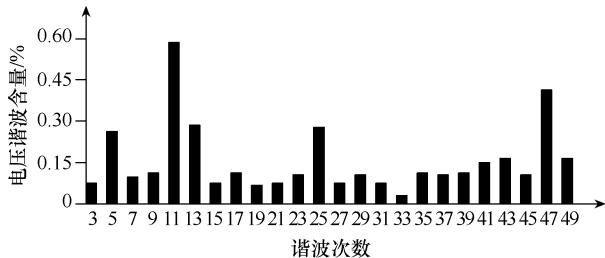


图 1 电压谐波含量示意图

由图 1 可以看出，该电网中 11/13/25/47 次电压谐波含量较高。

以测控装置采样频率为 2.4k/s，即每周波采样 48 点进行分析。根据采样定理，高于 1200Hz 部分频谱经离散化采样后会混叠到 1200Hz 以下的频谱中去。根据式 (1)^[8] 计算可知，47 次谐波（频率 2350Hz）经离散化采样后会混叠到 50Hz 处，相应的，46~33 次谐波（频率 2300~1650Hz）经离散化采样后会混叠到 2~15 次谐波处。

$$f_a = |f - n \cdot f_s| \quad (1)$$

式中， $n = \text{Int}(f/f_s + 0.5)$ ； f_a 为离散采样后波形频率； f 为实际信号频率； f_s 为采样频率；Int 表示取整操作。

为测试高频谐波对测控测量精度的影响，采用 OMICRON 256plus 测试仪对测控装置进行了加量验证。

测试中，三相对称额定基波电压 57.735V、三相对称额定基波电流 1A、电压电流夹角 45°、基波频率 50Hz，同时施加含量为 0.465% 的 47 次谐波电压以及含量为 0.5% 的 47 次谐波电流，观察其对基波有效值以及功率测量结果的影响。测试结果见表 1。

表 1 47 次谐波影响测试

相别	A 相	B 相	C 相	理论值
电压/V	58.0100	58.0300	58.0100	57.7300
电流/A	1.0052	1.0043	1.0051	1.0000
有功功率/W	41.2340	41.2160	41.2370	40.8170
无功功率/Var	41.2670	41.2040	41.2320	40.8170

测试结果表明，电压最大误差为 0.51%；电流最大误差为 0.52%；功率最大误差为 1.1%。遥测量的测量误差均超过了 GB/T 13729 要求的电压电流 0.2%、功率 0.5% 的误差允许范围。

2 低通滤波器设计

考虑硬件回路实现的简单可靠，在测控装置 AD 采样前端采用一阶 RC 回路低通滤波器进行高频滤波。

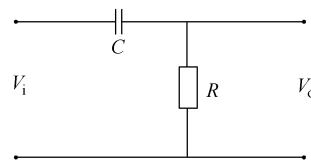


图 2 一阶低通滤波器实现电路

对应的幅值增益系数和相角偏移如式 (2) 和式 (3) 所示。

$$H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \quad (2)$$

$$\Phi(\omega) = -\arctan(\omega RC) \quad (3)$$

相应的截止频率 f_c 为

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4)$$

为保证高频谐波含量在 GB/T 14549 允许范围内时对有效值的影响不会导致有效值误差超过 GB/T 13729 标准的要求，同时考虑 RC 器件发生一定范围容值及阻值偏差时不会影响有效值的计算精

度,一阶低通滤波器截止频率设计为1089Hz。对应的1~15次谐波幅值的幅频响应及相频响应见表2。

表2 幅频响应及相频响应

谐波次数	信号频率/Hz	幅频响应	相频响应/°
1	50	0.998947	-2.63028
2	100	0.995810	-5.2494
3	150	0.990645	-7.8466
4	200	0.983548	-10.4117
5	250	0.974643	-12.9351
6	300	0.964081	-15.4084
7	350	0.952030	-17.8242
8	400	0.938672	-20.1761
9	450	0.924192	-22.4591
10	500	0.908775	-24.6692
11	550	0.892601	-26.8037
12	600	0.875842	-28.8606
13	650	0.858655	-30.8392
14	700	0.841183	-32.7394
15	750	0.823556	-34.5618

由表2中可以看出,经过低通滤波之后,2~15次谐波的幅值衰减已经远远超过了标准中规定的0.2%的误差允许范围,需要针对性的进行补偿。

3 补偿方案设计

根据式(2)和式(3)可知,经过低通滤波之后将对应幅值和相角补偿到原始值的补偿公式如式(5)、式(6)所示。

$$CO(f_i) = \sqrt{1 + (2\pi f_i RC)^2} \quad (5)$$

$$T(f_i) = \arctan(2\pi f_i RC) \quad (6)$$

式中, f_i 为对应幅值所在频点对应的频率值。

由式(5)、式(6)可以看出,补偿系数在RC确定(即截止频率确定)的情况下,与实际电网频率严格相关。

基于以上分析,设计出经低通滤波后幅值和相角的频率自相关补偿方案如下。

1) 创建初始1~15次谐波幅值及相位补偿系数表,该系数表基于截止频率1089Hz所选RC器件参数以及基波频率50Hz生成,见表3。

2) 根据实际计算出的电网频率计算出实际的补偿系数。

表3 幅频及相频初始补偿系数

谐波次数	频率/Hz	幅值补偿系数	相位补偿系数/rad
1	50	1.001054	0.045884
2	100	1.004208	0.091573
3	150	1.009443	0.136879
4	200	1.016727	0.181625
5	250	1.026017	0.225646
6	300	1.037257	0.268792
7	350	1.050387	0.310933
8	400	1.065335	0.351962
9	450	1.082027	0.391787
10	500	1.100383	0.430341
11	550	1.120321	0.467575
12	600	1.141758	0.503457
13	650	1.164613	0.537973
14	700	1.188802	0.57112
15	750	1.214246	0.602911

$$\frac{CO(f_i)}{CO(f)} = \sqrt{\frac{1 + (2\pi f_i RC)^2}{1 + (2\pi f RC)^2}} \quad (7)$$

$$\frac{T(f_i)}{T(f)} = \frac{\arctan(2\pi f_i RC)}{\arctan(2\pi f RC)} \quad (8)$$

从而可以得到实际频率下幅值和相角补偿系数,即

$$CO(f_i) = \sqrt{K_i^2 (CO^2(f) - 1) + 1} \quad (9)$$

$$T(f_i) = T(f) \arctan K_i \quad (10)$$

式中, f 为 50Hz 工频基波频率下 1~15 次谐波频率; f_i 为实际基波频率下 1~15 次谐波频率; $K_i = f_i/f$, 为实际频率与基准频率 50Hz 的比值; $CO(f)$ 和 $T(f)$ 分别为 50Hz 工频基波频率下对应的 1~15 次谐波幅值和相位补偿系数, $CO(f_i)$ 和 $T(f_i)$ 为实际计算基波频率下对应的 1~15 次谐波幅值和补偿系数。

基于上述流程,测控装置根据实际计算出的基波频率计算出 1~15 次谐波实际频率,代入步骤(2)中的式(9)和式(10),基于步骤(1)中的初始补偿系数表,通过少量的运算即可计算出实际的 1~15 次谐波幅值及相位补偿系数,实现上简单方便,不会对测控装置 DSP 负载带来大的影响。

以电网实际基波频率 45Hz 以及 55Hz 为例,可计算得到 1~15 次谐波的幅值及相位实际补偿系数,见表 4。

表 4 幅频及相频补偿系数

谐波次数	基波频率 45Hz		基波频率 55Hz	
	幅值补偿系数	相位补偿系数 /rad	幅值补偿系数	相位补偿系数 /rad
1	1.000854	0.045449	1.001275	0.050490
2	1.003410	0.090708	1.005089	0.100722
3	1.007656	0.135596	1.011415	0.150446
4	1.013570	0.179940	1.020205	0.199430
5	1.021125	0.223578	1.031397	0.247462
6	1.030282	0.266365	1.044913	0.294354
7	1.041001	0.308175	1.060664	0.339948
8	1.053233	0.348899	1.078553	0.384116
9	1.066927	0.388451	1.098474	0.426761
10	1.082027	0.426761	1.120321	0.467812
11	1.098474	0.463780	1.143981	0.507228
12	1.116211	0.499477	1.169346	0.544988
13	1.135175	0.533834	1.196307	0.581094
14	1.155306	0.566849	1.224758	0.615564
15	1.176546	0.598531	1.254598	0.648430

4 频率算法介绍

传统的过零点频率测量算法虽然简单且频率跟踪速度快，但是在电网电压中存在谐波的情况下频率计算精度会大大降低，简单的过零测频法无法直接应用在测控装置中。因此，设计了旋转向量频率测量方法，可以大幅提高电网电压谐波干扰下的频率计算精度。

装置通过移窗傅氏变换将连续时域信号转换为离散频域信号，并采用分解出的基频分量根据其相量旋转测量频率，可靠解决了谐波以及直流拖尾效应对频率测量的影响，提升了频率测量的精度，利用该方法，频率的测量误差可以达到 0.001Hz 以内。同时不影响频率变化情况下采样动态响应速度。具体实现流程如图 3 所示。

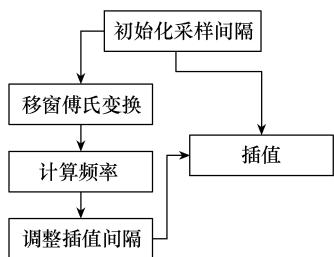


图 3 旋转向量法频率计算流程图

5 方案实现及验证

将上述改进方案在公司开发的测控装置中进行了实现。

测控装置采样速率为 2.4k/s，采样后根据频率计算结果实时更新插值间隔，确保每周波 48 点数据，插值后采样数据用于各类遥测量的计算。

经上述改进后，测控装置模拟量计算实现流程设计如图 4 所示。

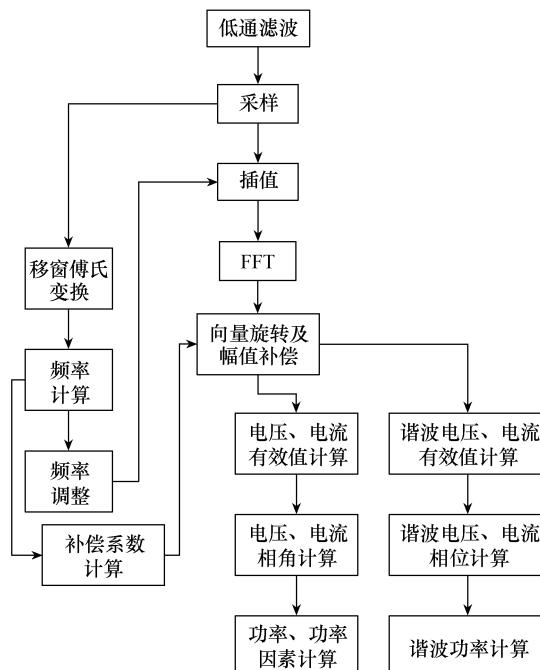


图 4 改进方案实现流程图

由实现方案可以看出，根据实际计算出的频率结果结合程序中预先定义的初始补偿系数，可以计算出实际补偿系数，从而对傅里叶分解得到的实部虚部向量进行幅值和相位的补偿。

在实际程序实现过程中，为了减少程序执行过程中的运算量，需要将相位补偿系数事先分解为实部和虚部旋转向量后再分别形成相应的系数表。

为验证方案在测控装置中的实际应用效果，对改进后的测控装置进行了如下测试。

测试一：对比测控装置采用频率自相关补偿算法改进前后在基波频率偏离 50Hz 情况下 1~15 次谐波计算结果的精度差异，验证算法的有效性。

测试以实际基波频率 45Hz 及 55Hz 为例进行，分别施加 1~15 次谐波电压 10V，测控装置采用频率自相关补偿算法改进前后的谐波计算结果见表 5 和表 6。

表 5 基波频率 45Hz 对比测试

谐波次数	改进前测量结果/V	改进后测量结果/V	改进前测量误差/V	改进后测量误差/V
1	9.99	9.98	-0.01	-0.02
2	10.01	9.99	0.01	-0.01
3	10.00	9.98	0.00	-0.02
4	10.02	9.99	0.02	-0.01
5	10.03	9.99	0.03	-0.01
6	10.06	9.99	0.06	-0.01
7	10.09	10.01	0.09	0.01
8	10.10	9.99	0.10	-0.01
9	10.15	10.01	0.15	0.01
10	10.17	10.01	0.17	0.01
11	10.20	10.00	0.20	0.00
12	10.22	10.00	0.22	0.00
13	10.27	10.01	0.27	0.01
14	10.29	10.01	0.29	0.01
15	10.32	10.00	0.32	0.00

表 6 基波频率 55Hz 对比测试

谐波次数	改进前测量结果/V	改进后测量结果/V	改进前测量误差/V	改进后测量误差/V
1	9.98	9.99	-0.02	-0.01
2	9.98	9.99	-0.02	-0.01
3	9.97	9.98	-0.03	-0.02
4	9.96	9.99	-0.04	-0.01
5	9.94	9.99	-0.06	-0.01
6	9.92	9.99	-0.08	-0.01
7	9.91	10.01	-0.09	0.01
8	9.88	10.01	-0.12	0.01
9	9.85	10.01	-0.15	0.01
10	9.82	9.99	-0.18	-0.01
11	9.79	10.02	-0.21	0.02
12	9.76	10.00	-0.24	0.00
13	9.74	10.01	-0.26	0.01
14	9.69	9.99	-0.31	-0.01
15	9.67	10.01	-0.33	0.01

从表 5 和表 6 的测试结果可以看出, 采用基于表 3 系数的固定补偿方式进行补偿的情况下, 当电网频率偏离 50Hz 时, 谐波计算误差较大, 无法满足精度要求, 而经过频率自相关补偿算法改进后, 谐波计算结果不再受频率偏差影响。

测试二: 验证测控装置采用低通滤波抑制高频谐波影响以及采用频率自相关补偿算法改进后, 在高频谐波及基波频率偏差共同影响情况下模拟量的计算精度。

测试中选择基波频率为 49Hz、额定基波电压 57.735V、额定基波电流为 1A、电压电流夹角为 45°、额定有功功率为 122.45W。分别施加 GB/T 14549 允许范围内的 33~47 次高频谐波干扰, 查看电压电流有效值、2~15 次谐波以及功率有效值的计算结果。详细测试结果见表 7 和表 8。对应的最大计算误差见表 9。

表 7 高频对谐波测量影响测试

谐波次数	叠加谐波次数	谐波数值/V	叠加谐波数值/V	测量结果/V
1	47	10	0.269	9.970
2	46	10	0.115	9.970
3	45	10	0.115	9.990
4	44	10	0.115	9.990
5	43	10	0.283	10.010
6	42	10	0.115	10.010
7	41	10	0.291	10.010
8	40	10	0.115	10.010
9	39	10	0.115	10.010
10	38	10	0.115	9.990
11	37	10	0.310	9.990
12	36	10	0.115	10.000
13	35	10	0.322	10.030
14	34	10	0.115	10.030
15	33	10	0.115	10.030

表 8 高频对有效值测量影响测试

叠加谐波次数	叠加谐波数值/V	叠加谐波数值/A	电压有效值测量结果/V	电流有效值测量结果/A	功率测量结果/W
47	0.2690	0.0050	57.7800	1.0007	122.5860
46	0.1150	0.0050	57.7200	1.0002	122.4540
45	0.1150	0.0050	57.7400	1.0004	122.4670
44	0.1150	0.0050	57.7200	1.0002	122.4550
43	0.2830	0.0050	57.7400	1.0002	122.4790
42	0.1150	0.0050	57.7200	1.0002	122.4360
41	0.2910	0.0050	57.7200	0.9998	122.4610
40	0.1150	0.0050	57.7200	1.0002	122.4580
39	0.1150	0.0050	57.7400	1.0004	122.4460

(续)

叠加谐波次数	叠加谐波数值/V	叠加谐波数值/A	电压有效值测量结果/V	电流有效值测量结果/A	功率测量结果/W
38	0.1150	0.0050	57.7200	1.0002	122.4580
37	0.3100	0.0050	57.7400	1.0004	122.4270
36	0.1150	0.0050	57.7100	1.0000	122.4590
35	0.3220	0.0050	57.7400	1.0004	122.4330
34	0.1150	0.0050	57.7100	0.9998	122.4580
33	0.1150	0.0050	57.7200	1.0002	122.4610

表9 高频影响下最大误差统计

数据类型	最大计算误差/%
电压	0.078
电流	0.070
功率	0.110
谐波	0.052

根据上述测试结果可以看出，经过改进后的测控装置，可以有效解决高频谐波对测控测量精度的影响，同时，当电网基波频率偏离为 50Hz 时，测控装置计算出的电压电流功率以及 2~15 次谐波的最大误差也远小于电压电流为 0.2%、功率为 0.5% 的误差允许范围。

6 结论

本文针对测控装置采用低通滤波器解决频谱混叠引起的 2~15 次谐波衰减问题，以及传统的固定补偿方式在频率偏差情况下的局限性，设计了一种频率自相关补偿算法，通过实时基波频率计算结果，自动调整 15 次及以下各次电压电流幅值及相角补偿系数，从而保证了电压电流以及功率的测量精度。同时，设计了旋转向量频率计算方法，大幅提高谐波干扰下的频率计算精度，从而为低通补偿系数的

准确计算提供了保证。

测试结果表明，经过本文方案改进后的测控装置，在高频谐波影响以及电网基波频率偏离为 50Hz 环境下，电压电流以及功率的测量精度依然可以完全满足 GB/T 13729 标准的要求。

改进后的测控装置已经被广泛应用于高压换流站及其周边变电站以及分布式发电系统升压变电站。实际运行效果表明，改进后的测控装置在一次电网中存在高频谐波的情况下依然可以正确测量电网的电压电流功率等数据，遥测精度高于 GB/T 13729 标准的允许误差要求。

参考文献

- [1] 韩民晓. 高压直流输电原理与运行[M]. 北京：机械工业出版社，2013.
- [2] Vittal V. 风力发电并网及其动态响应[M]. 北京：机械工业出版社，2014.
- [3] 熊慕文，陈桂友，朱何荣. 基于双平面的测控装置集成与研制[J]. 电气技术，2014(11): 25-28, 36.
- [4] 王世一. 数字信号处理[M]. 北京：北京理工大学出版社，1987.
- [5] GB/T 14549—1993. 电能质量 公用电网谐波[S].
- [6] 戴卫力，费峻涛. 电力电子技术在电力系统中的应用[M]. 北京：机械工业出版社，2015.
- [7] 陈桂友，朱何荣，熊慕文，等. 一起直流换流站测控装置测量电压跳变实例分析[J]. 电气技术，2015(12): 139-141.
- [8] 应怀樵，沈松，刘进明. 频率混叠在时域和频域现象中的研究[J]. 振动、测试与诊断，2006, 26(1): 1-4.

作者简介

朱何荣（1985-），男，江苏盐城人，硕士，工程师，主要从事智能变电站自动化系统、电能质量监测与分析系统研发工作。

New新闻与动态

低成本光伏散热型汇流箱

近日，国家知识产权局公布专利“低成本光伏散热型汇流箱”，申请人为安徽灿邦电气有限公司。

本实用新型公开了一种低成本光伏散热型汇流箱，包括箱体，箱体的后侧通过固定螺栓和支架相固定，箱体的底部设有接口组件，箱体的两侧下端对称开设有至少一个

散热孔，散热孔呈矩形，相互间按百叶窗式结构排布。

本实用新型结构简单，使用方便，既避免了由于防水胶条的长期使用出现的老化脱落的现象，又通过百叶窗式散热孔增加汇流箱箱体的散热性能，同时箱体结构的优化也减少了汇流箱的成本，降低后期运行维护的成本。