

3 种典型间谐波源的间谐波测量及结果分析

金维刚¹, 刘会金¹, 李智敏², 乔中华², 季安平², 王惠丽²

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072;

2. 三门峡供电公司, 河南 三门峡 472000)

摘要: 论述了间谐波检测装置的研制, 介绍了间谐波检测算法(迭代 DFT 算法)的优点、硬/软件设计流程、装置的校验方法及实验结果; 提出了“间谐波记录”这一概念, 有利于衡量电力系统中谐波的含量。对 3 种典型间谐波源进行了间谐波的实际测量工作; 分析了间谐波的测量结果, 指出由于 3 个测量点所带的间谐波源负荷不同, 所监测到的间谐波成分也各有特点。根据测量结果, 指出了 IEC61000 系列标准在应用中存在的缺陷; 并且建议, 中国的间谐波标准应该按 4 个频率段的划分来取不同的间谐波限值。

关键词: 间谐波源; 间谐波记录; 测量; 间谐波标准; 频率段; 限值

中图分类号: TM 714

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)12-0030-06

0 引言

除了具有谐波的危害之外, 间谐波的危害还具有其特殊性, 例如引起灯光闪烁(闪变)、导致无源滤波失败、降低滤波器的寿命以及干扰低频电力载波信号等。在消除谐波污染的同时, 不考虑间谐波将会产生严重的后果。鉴于间谐波广泛的危害性, 精确地检测间谐波、制定出合理的间谐波限制标准, 已成为当务之急。

2009 年 10 月 16 日~19 日, 在三门峡电力局的配合和支持下, 笔者利用自行研制的间谐波在线监测装置, 针对三门峡地区电网内的 3 种典型间谐波源: 灵宝背靠背换流站、110 kV 电气化铁路以及硅铁厂电弧炉, 进行了 72 h 的间谐波监测工作。本次监测共涉及 220 kV、110 kV 和 10 kV 3 个电压等级, 获得了大量有价值的间谐波参数信息。在此之前, 国内外都未有针对电力系统中的实际的间谐波源进行间谐波在线监测的报道。

本文首先论述了间谐波在线检测装置的研制, 介绍了间谐波检测算法(迭代 DFT 算法)的优点、硬/软件设计流程、装置的校验方法及实验结果; 特别地, 阐释了“间谐波记录”这一概念, 指出这一概念可以从一定程度上衡量电力系统中谐波的含量及危害程度。然后分析了 3 种典型间谐波源的间谐波测量结果, 并为中国间谐波标准的制定提出了建议; 指出了 IEC61000 系列标准中, 关于间谐波检测及限值方面的相关规定是有缺陷的, 不宜直接应用于中国电力系统; 同时建议, 中国的间谐波标准应该按照 4 个频率段划分, 为每个频率段制定不同的间谐波限值。

1 间谐波检测装置的研制

1.1 间谐波检测装置的设计

图 1 为间谐波检测装置硬件结构图。由图 1 可以看出, 信号源发出的信号在经过传感器和前置信号处理板之后, 由 NI PCI-6133 数据采集板采集信号, PCI-6133 采集到的数据送入 PC 机由相应软件进行分析、计算以及结果存储, 其结果会生成报表, 也可以打印输出。

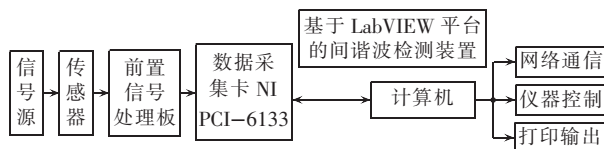


图 1 间谐波检测装置硬件结构图

Fig.1 Hardware structure of interharmonic detection equipment

电压传感器型号为 WBV411D07, 电流传感器型号为 WBI411D47, 传感器对频率处于 DC~5 kHz 范围内的信号不会产生失真。

前置信号处理板共设置了 7 个输入通道; 在实际测量时只使用了其中的 6 个, 分别用来输入三相电压、电流信号; 余下的一个作为备用通道。信号处理板可以滤除频率高于 20 kHz 的高频噪声; 当电压传感器接幅值为 100 V 的正弦电压输入信号、电流传感器接幅值为 5 A 的正弦电流输入信号时, 处理板的电压/电流输出通道均输出 1.1 V 的正弦电压信号, 这样就可以确保处理板工作在线性区; 然后在用 LabVIEW 软件编程时, 再用偏移量修正和幅值修正的方式, 恢复原信号的幅值。

间谐波检测算法采用迭代 DFT 算法^[1], 该算法有 5 个优点: 实时性好, 理论上仅需 0.12 s 的采样时间就可以达到 0.1 Hz 的分辨率; 不受基频偏移和非同步采

样的影响;受白噪声的影响非常小;改变频点数就可以自适应地改变频率分辨率;迭代 DFT 的核函数与傅里叶变换的核函数相同,因此其计算过程能用 FFT 实现,迭代 DFT 算法的计算量与 FFT 的计算量是一个数量级。

间谐波检测装置采用 LabVIEW8.20 为软件平台,将上述的迭代 DFT 算法用 LabVIEW 图形化数据流语言编成分析程序,对 PCI-6133 采集到的实时数据进行分析计算,得到各次谐波/间谐波信号的幅值、频率、相位等参量信息。LabVIEW 自带的丰富的功能节点和结构控制模块确保了整个软件界面结构清晰、生动灵活。

1.2 间谐波检测装置的综合校验

在间谐波检测装置研制完成后,利用 KS833 电测量仪表综合校验装置对该检测装置的精度进行了校验。KS833 可以发出频率范围为 45~65 Hz 的单一间谐波信号,调节细度为 0.001 Hz,准确度为 0.01%;也可以发出混合谐波信号,谐波输出精度为 0.1%(2~19 次,相对于基波)以及 0.2%(20~31 次,相对于基波),谐波相位 0°~359.9°可调。校验时发现,当间谐波频率调节细度取为 0.1 Hz,幅值≥0.005 V 时,检测装置可以基本无误差地检测间谐波频率,幅值检测的误差小于 1%;检测混合谐波时,基本上可以无误差地检测各次谐波的频率,若基波幅值≥1 V 且各次谐波幅值均≥0.01×基波幅值,则对各次谐波的幅值检测误差也小于 1%。

除了 KS833 标准源之外,还自行研制了一套 AC/DC/AC 变流装置,如图 2 所示。该变流装置在工作过程中,由于两侧交流系统的信号频率不同,就会在直流侧交叉耦合从而形成不同频率下的纹波,纹波通过变流装置向两侧传播,从而在两端的交流侧产生了各种频率的间谐波^[2]。而间谐波检测装置就是对该变流装置运行过程中产生的间谐波信号进行检测分析。因此,所研制的变流装置就是间谐波检测装置的另一个信号源。

图 2 中 u_a 、 u_b 、 u_c 为系统工频电源,S 为三相空气开关,T 为三相调压器, L_s 为限流电抗器,C 为储能电容兼具滤波作用, L 为交流侧负载电抗器, i_{fa} 、 i_{fb} 和 i_{fc}

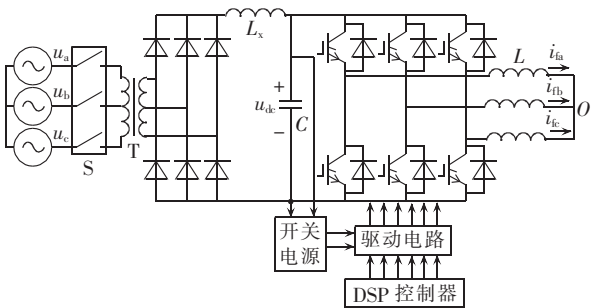


图 2 AC/DC/AC 变流装置主电路结构示意图
Fig.2 Main circuit of AC/DC/AC converter

为逆变侧负载电流。各元件参数为: $L_s=13.2\text{ mH}$, $C=4\ 400\ \mu\text{F}$,调压器 T 的容量 $S_N=50\text{ kV}\cdot\text{A}$;选用三相电抗器作负载,负载可调,包含 0.42 mH、0.84 mH、1.26 mH 3 级;驱动电路采用直流开关电源供电方式,该开关电源在直流侧电容上直接获取输入电压。由于逆变器采用相控方式时,其交流侧谐波含量较大,两侧交流系统之间的相互影响比较明显,故整流器采用二极管不控整流,而逆变器采用 180°相控方式。

利用上述的 2 种信号源:KS833 标准源和 AC/DC/AC 变流装置,做了大量实验。间谐波检测装置对 2 种信号源发出的电压/电流波形信号进行检测分析,检测出电压/电流波形信号中各次谐波、间谐波信号的幅值、频率、相位等信息,以此检验间谐波检测装置的精度和可靠性。下面列举 2 次实验的结果,并进行分析。

实验 1:信号源采用 KS833 标准源;表 1 给出了 KS833 发出的混合信号中各频率成分的参数,以及间谐波检测装置对该混合信号的检测结果。可以看出:该装置准确地检测出了该组混合信号的频率成分,以及各频率成分的幅值和相位。

实验 2:对 AC/DC/AC 变流装置运行过程中产生的间谐波信号进行检测分析;实验时,逆变器输出频率为 60 Hz,负载为 $L=0.42\text{ mH}$ 的电抗器,系统侧不含变压器;由于负载较小,较小的直流电压在逆变器输出端也将产出较大的输出电流。系统侧 A 相电流的谐波/间谐波检测结果如表 2 所示。

由文献[2]研究结果可知,系统侧特征谐波频率为 $f_h=(6k_1\pm 1)f_1$,间谐波频率为 $f_{fh}=(6k_1\pm 1)f_1\pm 6k_2f_2$ 。

表 1 KS833 标准源发出的混合谐波信号的检测结果

Tab.1 Experimental results of mixed harmonics detection for KS833 standard source

KS833 发出的混合信号(被测信号)			间谐波检测装置测量结果		
U_m/V	f/Hz	$\phi/(^{\circ})$	$U_m/\text{V}(e/\%)$	$f/\text{Hz}(e/\%)$	$\phi/(^{\circ})(e/(^{\circ}))$
5.5	50	0	5.50022(0.0040)	50(0)	0.047 6234(0.047 6)
0.165	100	45.5	0.165015(0.0091)	100(0)	45.4918(-0.0082)
0.495	150	179	0.495005(0.0010)	150(0)	178.681(-0.3190)
0.11	200	231	0.110 452(0.410 9)	200(0)	231.296(0.2960)
0.385	250	120	0.385006(0.0016)	250(0)	120.129(0.1290)
0.1375	300	265	0.137509(0.0065)	300(0)	265.616(0.6160)
0.275	350	134	0.275 111(0.040 4)	350(0)	134.118(0.1180)
0.055	400	235	0.0549275(-0.131 8)	400(0)	235.045(0.0450)

注:e 为误差。

表 2 变流装置发出的谐波、间谐波信号的检测结果

Tab.2 Experimental results of harmonics and interharmonics detection for converter

I_m/A	f/Hz	$\phi/(^{\circ})$
0.400126	10	41.0011
9.18047	50	-175.2130
0.550313	110	144.9220
1.89012	250	69.2324
2.69142	310	-17.0128
1.21239	350	35.6103
2.64308	410	21.1139

从表 2 可见,对 A 相电流的检测结果显示,50 Hz、250 Hz、350 Hz 满足表达式 $f_h = (6k \pm 1)f_1$; 10 Hz、110 Hz、310 Hz、410 Hz 满足表达式 $f_{ih} = (6k_1 \pm 1)f_1 \pm 6k_2f_2$, 检测结果中频率成分与文献[2]的研究结果完全一致。

在实验室条件下做了大量类似的实验,结果表明:该检测装置能够非常准确地检测各谐波、间谐波分量的频率,从而使幅值、相角的检测结果也很准确;频率检测基本无误差,幅值检测误差小于 1%,相角检测误差小于 1° ;验证了检测装置的可靠性和准确性。

2 间谐波检测和分析

2.1 3 个间谐波测量点的基本信息

灵宝背靠背直流工程作为西北-华中联网工程,是中国第一个背靠背直流联网工程。针对灵宝换流站的间谐波测量,所选择的监测量为:三门峡电网紫东变电站紫 220 kV 北母电压(即灵宝换流站 220 kV 交流侧电压),以及灵紫线电流;测量时灵紫线仅带灵宝换流站环流单元 I 运行负荷,环流单元 I 的基本情况是:直流侧额定电压为 120 kV,直流侧额定电流为 3000 A,采用“一个单元,双向传输”的输电方式。

针对 110 kV 电气化铁路的间谐波测量,所选择的监测量为:三门峡电网会兴变电站会 110 kV 东母电压,会牵线电流;会 110 kV 东母通过会牵线向三门峡牵引站供电。三门峡牵引站主变 A-C 的额定容量为 20 MV·A, B-C 的额定容量为 20 MV·A;接线形式为 V/V;额定电压为 110 kV/27.5 kV。

针对硅铁厂电弧炉的间谐波测量,所选择的监测量为三门峡电网润南变电站润 10 kV 东母电压,Ⅱ润铁线电流;润 10 kV 东母通过Ⅱ润铁线向硅铁厂供电。硅铁厂的 1 号炉变是锦州新生变压器有限公司 2003 年制造的,额定容量为 4000 kV·A,连接组别为 Yd11,高压侧电压为 10 kV;硅铁厂 2 号炉变是江苏无锡阳山整流变压器厂 1997 年生产的,炉变的等值容量为 3150 kV·A,接线组别为 Dd0,初级电压为 10 kV。

每个测量点的测量时间段均为 24 h。

2.2 间谐波限值的选取及间谐波记录的保存方式

目前,国标中还没有关于间谐波限值的规定。鉴于 IEC61000 系列标准已经得到广泛的认可和接受,因此,本次测量即依照 IEC61000-3-6 中的建议^[3]：“将间谐波电压水平限制到 0.2% 以下”。如果

某一间谐波分量的电压含有率超过 0.2%,即认为该间谐波分量的电压含有率超标。

测量时,间谐波检测装置采样率设置为 3000 Hz,采样时间设置为 0.2 s,检测算法迭代阈值设为 0.001,频率分辨率可以达到 1 Hz。检测装置对每 0.2 s 采样得到的数据进行频谱分析,得到该 0.2 s 采样数据中所包含的各间谐波、谐波、基波的幅值、频率、相位;如果该 0.2 s 采样数据中有某个间谐波分量的电压含有率超标(即超过 0.2%),则该 0.2 s 采样数据中所有间谐波、谐波、基波的幅值、频率、相位信息都会被记录下来,连同该 0.2 s 采样数据的采样开始时刻(绝对时间)一起构成一条完整的保存记录(如果该 0.2 s 采样数据中有 M 个间谐波分量的电压含有率均超标,则保存 M 条记录,但每条记录的归类标识不同);反之,如果该 0.2 s 采样数据中各间谐波分量的电压含有率均未超标,则该 0.2 s 采样数据的频谱分析结果将不会被保存下来。

故而,本文中若提到“间谐波记录”,指的就是电压含有率超过 0.2% 的间谐波的记录。

依据间谐波记录的这种保存方式,可以得出以下 2 点结论:

a. 检测装置所生成的报表中如果有某种频率成分的间谐波的记录,则该间谐波一定在电网中实际存在,而且报表中记录的幅值即是该间谐波的实际幅值;

b. 可以近似认为,如果某种间谐波的记录条数越多,幅值越大,则该间谐波在电网中的含有率越高,危害性越应该引起关注。

2.3 间谐波测量结果分析

对 3 个测量点进行了间谐波的测量,获得了大量的间谐波电压、电流值数据,但是,由于 IEC61000 系列标准中只规定了间谐波电压水平限值,对间谐波电流限值并未作出相关规定。因此,本文对间谐波测量结果的分析仅针对间谐波电压。

在 3 个监测点共得到间谐波记录 4140 条;这里列出其中的 2 条记录,分别如表 3 和表 4 所示(表中略去幅值小于 25 V 的谐波成分)。

表 3 所示的间谐波记录(I)是在 110 kV 电气化铁路的 A 相监测到的,该记录中 1447 Hz 的间谐波成分幅值达 174.9 V,超过了 0.2% 的限值。

表 4 所示的间谐波记录(Ⅱ)也是在 110 kV 电气化铁路的 A 相监测到的,该记录中有 2 个间谐波成分:一个是 1462 Hz 的间谐波成分,幅值为 171.3 V,超过了限值;另一个是 1275 Hz 的间谐波成分,幅值为 53.2 V,没有超过限值。

总体上,在 3 个监测点所监测到的间谐波的频率分布各有特点。

在紫 220 kV 北母 C 相,监测到大量的频率位于 714~768 Hz 之间的间谐波,记录数总共有 1922 条,幅值最大值为 336 V;其中,记录数最多的 3 种间谐

表 3 间谐波记录 (I)
Tab.3 Interharmonic record (I)

序号	U_m/V	f/Hz	$\phi/(^{\circ})$
0	62 943.676 493	50	67.538 819
1	1 156.046 841	150	-136.798 611
2	290.981 212	250	-91.501 938
3	36.352 970	300	-176.141 558
4	266.784 226	350	-142.025 750
5	132.644 869	450	-175.430 162
6	63.050 650	550	-9.260 364
7	142.219 963	750	44.046 519
8	126.432 276	850	11.382 743
9	81.359 499	950	-47.495 052
10	221.718 681	1 050	39.346 948
11	345.153 318	1 150	-67.354 717
12	262.227 746	1 250	-164.973 086
13	174.888 131	1 447	137.072 710
14	172.217 587	1 450	-110.446 823

表 4 间谐波记录 (II)
Tab.4 Interharmonic record (II)

序号	U_m/V	f/Hz	$\phi/(^{\circ})$
0	65 268.473 261	50	-172.545 462
1	447.854 196	150	-103.490 097
2	251.067 986	250	-101.030 351
3	61.491 067	350	88.213 069
4	25.299 423	450	22.791 708
5	215.090 081	550	-141.755 685
6	71.183 292	650	-76.531 269
7	63.869 469	850	160.242 844
8	227.219 037	950	29.597 316
9	29.063 744	1 000	-171.822 892
10	192.258 612	1 050	-82.554 333
11	270.768 511	1 150	43.962 617
12	56.006 298	1 250	160.991 252
13	53.202 960	1 275	134.540 451
14	117.548 786	1 450	-95.392 677
15	171.328 886	1 462	112.775 699

波分别是 714 Hz、737 Hz 以及 768 Hz。714 Hz 间谐波的记录数为 326 条,幅值最大值为 307.2 V,最小值为 254 V;737 Hz 间谐波的记录数为 484 条,幅值最大值为 336 V,最小值为 310.4 V;768 Hz 间谐波的记录数为 1107 条,最大值为 324.3 V,最小值为 289 V。

在紫 220 kV 北母 A 相,监测到频率为 60 Hz 的间谐波,记录数为 96 条,最大值为 576.9 V,最小值为 254.7 V。

在会 110 kV 东母,A、C 两相都监测到频率高于 1 200 Hz 的间谐波;在 A 相监测到 1 447 Hz 和 1 462 Hz 2 种间谐波,记录数分别为 55 条和 66 条,幅值最大值分别为 692.7 V 和 398 V,幅值最小值分别为 174.9 V 和 134.3 V;在 C 相监测到频率为 1 252 Hz 的间谐波,记录数为 60 条,幅值最大值为 286.7 V,最小值为 164.4 V。

在润 10 kV 东母,A、B、C 三相所监测到的间谐波的频率均小于 60 Hz,且三相都监测到频率为 18 Hz、21 Hz 以及 25 Hz 的低频次谐波。18 Hz 间谐波的三相记录总数为 917 条,幅值最大值为 114.7 V,最小

值为 18.1 V;21 Hz 间谐波的三相记录总数为 309 条,幅值最大值为 46.7 V,最小值为 12 V;25 Hz 间谐波的三相记录总数为 707 条,幅值最大值为 92.2 V,最小值为 11.6 V。此外,在 A 相还监测到 55 Hz 的间谐波,但记录数只有 8 条,幅值最大值为 24.6 V,最小值为 12.9 V。

很明显,3 个测量点所带的间谐波源负荷不同,所监测到的间谐波的频率成分也有很大区别;而且,对灵宝背靠背换流站和电气化铁路 2 个测量点,在同一母线不同相测得的间谐波频率也有较大差别;这可能与 3 种间谐波源产生间谐波的机理、特点以及频率成分不同有很大关系。

3 间谐波测量结果对中国制定间谐波标准的启示

IEC61000 系列文件是国标电磁兼容标准文件,其中也涉及到间谐波的测量取值和限值等方面的规定,但是,在制定间谐波标准的过程中,不能照搬 IEC 61000 的相关规定,而必须是在全面了解中国电网间谐波的实际情况的基础上,参考 IEC61000 标准,真正制定出符合中国国情的间谐波标准。

具体有以下 2 点建议。

第一,建议采用具有更高频率分辨率(即分辨率数值更小)和更高检测精度的间谐波检测算法。

IEC61000-4-7 和 IEC61000-4-30 规定的间谐波检测的标准^[4-5]：“采样时间为 0.2 s,窗函数为矩形窗(不对窗进行加权),FFT 的频率分辨率为 5 Hz,采用锁相环(PLL)技术实现同步采样”;显然,如果按照这种检测方法,三门峡电网中存在的大多数间谐波成分均不能被精确地检测。

虽然以上两标准也提出了谐波/间谐波集合(harmonic/interharmonic group)以及子集合(harmonic/interharmonic subgroup)的概念,但是,IEC 推荐的集合概念在应用上有其局限性^[6]。

a. 由于间谐波检测结果是用集合来表示的,只有集合的中心频率,所以仍不能得到每个间谐波分量的准确幅值、频率、相位信息;

b. 因为 $nf_0 \pm 5$ Hz 间谐波包含在以 nf_0 为中心频率的谐波集合中,所以不能检测到与 nf_0 邻近的这 2 个间谐波分量,而与谐波邻近的间谐波会引起严重的电压波动与闪变^[7]。

显然,在三门峡电网中实测到的低频次谐波(18 Hz 和 21 Hz),有可能激发汽轮发电机的轴系扭振,间谐波水平的最低限制阈值也应该对这种间谐波有约束性和针对性。但是前面的讨论表明,IEC 标准即使采用了集合的概念也无法准确检测出 18 Hz 和 21 Hz 间谐波的准确幅值,因此,若要制定出对它们有很强约束性的合理的限值标准也是有难度的,从而也就很难有效限制二者对三门峡电网的危害。

中国在制定间谐波标准的过程中,如果完全采用 IEC 推荐的检测标准,与中国的实际情况是否符合是一个值得思考的问题。目前已有文献^[8-10]提出用 Hanning 窗代替 IEC 推荐的矩形窗,以提高检测结果的精度,这方面的研究成果是值得参考的。

第二,制定间谐波标准就必须确定其限值,间谐波限值的规定应该主要从其直接危害角度出发,而间谐波的危害又与它所处的频率范围紧密相关。

IEC61000-3-6 中建议将 DC~2 kHz 的间谐波水平限制到 0.2% 以下,但是从应用的角度来看,这个规定有点过于笼统,因为 DC~2 kHz 内,处于不同频率段的间谐波,即使幅值相同,其危害也可能大不相同,取同一限值是不合适的。

从对三门峡电网间谐波的测量结果来看,电力系统中实际存在的间谐波,频率范围分布非常广,应该分频率段来制定限值。具体地,建议按以下 4 个频率段来取不同的间谐波限值。

a. 0~50 Hz. 0~50 Hz 的间谐波的危害主要体现在 2 个方面:一是引起灯光闪烁^[7](闪变),一是引起电力系统次同步振荡^[11-15]。文献^[16]通过仿真计算后指出:发电机轴系甚至能够经得住三相对地故障带来的冲击,但是不一定能够抵抗间谐波刺激轴系产生的累积疲劳寿命损耗。在对电弧炉负荷进行测量时,监测到的 18 Hz 间谐波与很多汽轮发电机的轴系自然频率严格合拍^[13-14];监测到的 21 Hz 的间谐波也与轴系自然频率非常接近,必须对它们的幅值进行严格的限制。所以,对于 0~50 Hz 频率段的间谐波,应该从抑制闪变和防止次同步振荡 2 方面考虑,来确定间谐波的限值。

b. 50~100 Hz. 50~100 Hz 的间谐波的危害主要是引起闪变^[7],因此,该频率段的间谐波限值的确定主要从抑制闪变的角度考虑。

c. 100~800 Hz. 100~800 Hz 的间谐波的危害主要是导致滤波失败、降低滤波器寿命以及干扰低频电力载波信号^[17]。在灵宝换流站就监测到大量处于此频率段的间谐波。

d. 800 Hz 以上. 从对电气化铁路的间谐波测量结果来看,频率 800 Hz 以上的间谐波也在电网中大量存在,也应该研究针对它们的限值。

总体上,对于以上 4 个频率段,0~50 Hz 频率段的间谐波限值应该严于(小于)50~100 Hz 频率段的间谐波限值,而 50~100 Hz 频率段的间谐波限值又应该严于(小于)100~800 Hz 频率段的间谐波限值。

4 结论

利用自行研制的间谐波检测装置,针对三门峡电网内的 3 种典型间谐波源进行了间谐波的实际测量工作,获得了大量有价值的间谐波参数信息。根据对测量结果的分析,为中国间谐波标准的制定提出了

合理的建议。

参考文献:

- [1] ZHANG Quanming, LIU Huijin, CHEN Hongkun, et al. A precise and adaptive algorithm for interharmonics measurement based on iterative DFT[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 1728-1735.
- [2] 李琼林, 刘会金, 张振环, 等. 基于互调原理的交直流系统中的间谐波分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(34): 107-117.
LI Qionglin, LIU Huijin, ZHANG Zhenhuan, et al. Interharmonic analysis in the AC/DC/AC system based on intermodulation theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(34): 107-117.
- [3] IEC. IEC61000-3-6 ElectroMagnetic Compatibility (EMC)-part 3: limits-section 6: assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power system-basic EMC publication[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 1996.
- [4] IEC. IEC61000-4-7 ElectroMagnetic Compatibility (EMC)-part 4-7: testing and measurement techniques-general guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto-basic EMC publication[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2002.
- [5] IEC. IEC61000-4-30 ElectroMagnetic Compatibility (EMC)-part 4-30: testing and measurement techniques-power quality measurement methods-basic EMC publication[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2003.
- [6] LI Chun, XU Wilsun, TAYJASANTANT T. Interharmonics: basic concepts and techniques for their detection and measurement[J]. Electric Power Systems Research, 2003, 66(1): 39-48.
- [7] 朱珂, 雍静, 泰亚萨内特. 间谐波对闪变影响的量化分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 113-118.
ZHU Ke, YONG Jing, TAYJASANTANT T. Quantifying flicker impact of interharmonics[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(28): 113-118.
- [8] BRACALE A, CARPINELLI G, LEONOWICZ Z, et al. Measurement of IEC groups and subgroups using advanced spectrum estimation methods[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(4): 672-681.
- [9] TESTA A, GALLO D, LANGELLA R. Interharmonic measurements in IEC standard framework[C]//Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference. Chicago, USA: [s.n.], 2002: 935-940.
- [10] TESTA A, GALLO D, LANGELLA R. On the processing of harmonics and interharmonics: using hanning window in standard framework[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 28-34.
- [11] SOLANICS P, KOZMINSKI K, BAJPAI M, et al. The impact of large steel mill loads on power generating units[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 24-30.
- [12] FICK H. Excitation of sub-synchronous torsional oscillations in turbine-generator sets by a current-source converter[J]. Siemens Power Engineering, 1982, 4(2): 83-86.
- [13] YACAMINI R. Power system harmonics IV: interharmonics[J]. Power Engineering Journal, 1996, 10(4): 185-193.
- [14] YACAMINI R. How HVDC schemes can excite torsional oscillations in turbo-alternator shafts[J]. IEEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 1986, 133(6): 301-307.
- [15] LAMBRECHT D, KULIG T. Torsional performance of turbine generator shafts especially under resonant excitation[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(10): 3689-3702.
- [16] TSAI J I, LIN C H, TSAO T P. Assessment of long-term life expenditure for steam turbine shafts due to noncharacteristic subharmonic currents in asynchronous links[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1): 507-516.
- [17] GUNTHER E W. Interharmonics-recommended updates to IEEE

519[C]//Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference. Chicago,USA:[s.n.], 2002:950-954.

(编辑: 李 玲)

作者简介:

金维刚(1983-),男,河南郑州人,博士研究生,研究方向为电能质量分析与控制(E-mail:jn101866@163.com);
刘会金(1952-),男,湖北大冶人,教授,博士研究生导

师,研究方向为电能质量分析与控制;
李智敏(1966-),男,河南三门峡人,高级工程师,硕士,长期从事电力生产技术监督和技术管理工作;
乔中华(1965-),男,河南三门峡人,高级工程师,长期从事电力生产技术监督和技术管理工作;
季安平(1973-),男,河南三门峡人,高级工程师,长期从事电力生产技术监督和技术管理工作;
王惠丽(1969-),女,河南三门峡人,工程师,长期从事电力生产技术监督工作。

Interharmonic measurement of three typical interharmonic sources and result analysis

JIN Weigang¹,LIU Huijin¹,LI Zhimin²,QIAO Zhonghua²,JI Anping²,WANG Huili²
(1. School of Electrical Engineering,Wuhan University,Wuhan 430072,China;
2. Sanmenxia Power Supply Company,Sanmenxia 472000,China)

Abstract: The interharmonic detection equipment is introduced,including the iterative DFT algorithm, hardware and software design,calibration method and experimental results. The concept of“interharmonic record” is presented to measure the interharmonic content of power grid. Practical interharmonic measuring is carried out for three kinds of typical interharmonic sources and the experimental results are analyzed, which shows that different interharmonic sources have different interharmonic components. According to the experimental results,it is pointed out that IEC61000 standards have defects in applications and four frequency intervals should be set and each has its own limit value.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China(50677045).

Key words: interharmonic source; interharmonic record; measurement; interharmonic standard; frequency interval; limit value