

电能质量 公用电网间谐波

刘军成

2009年9月 上海

主要内容

- 1、编制说明；
- 2、间谐波定义及其危害；
- 3、间谐波的监测及其主要危害仿真分析；
- 4、相关国际（地区组织）间谐波标准介绍；
- 5、标准主要内容解释及标准的主要争论焦点；
- 6、标准的技术经济评价

1、编制说明

- 1) 间谐波问题的认识;
- 2) 间谐波起草的指导思想:
 - 主导思想 ;
 - 可操作性 ;
 - 间谐波电压、电流的考量;
- 3) 主要争议: 数据简约方法

2、间谐波定义及其危害

1) 间谐波的定義

- 谐波 (harmonics)
- 间谐波 (interharmonics)
- 次谐波 (sub-harmonics)

2、间谐波定义及其危害

2) 间谐波源

- 变流装置
- 交流电弧炉
- 通断控制的电气设备

2、间谐波定义及其危害

3) 间谐波的危害

间谐波具有谐波引起的所有危害，其危害主要表现在下述方面：

- 产生闪变
- 导致显示屏闪烁；
- 造成滤波器谐振、过负荷；
- 引起通讯干扰；
- 引起电动机发电机附加力矩；
- 引起过零点监测误差；
- 引起感应线圈噪声；
- 影响脉冲接收器正常工作。

3、间谐波的监测 及其主要危害仿真分析

3.1 间谐波监测相关仿真分析

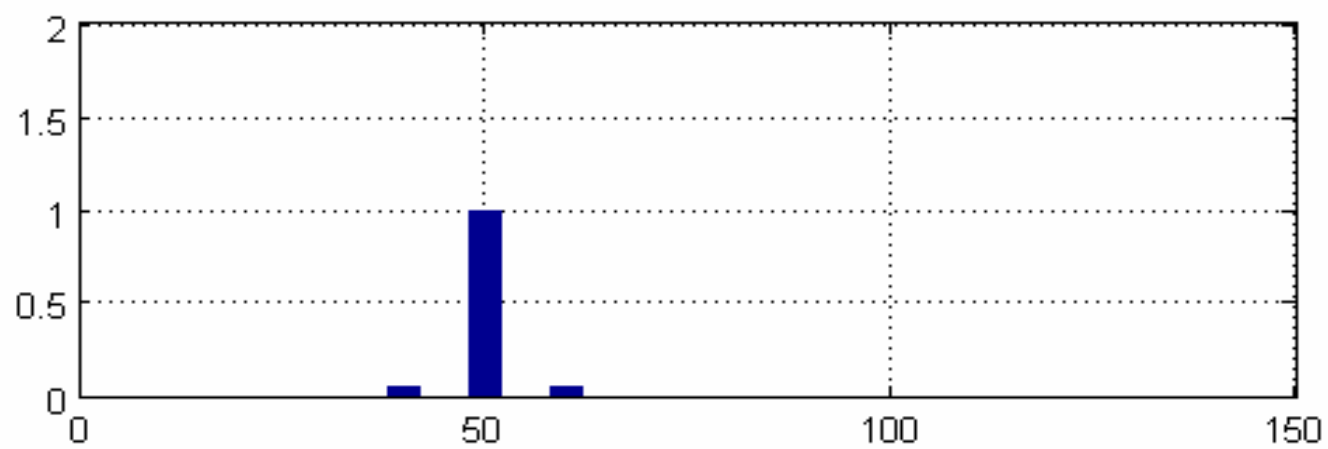
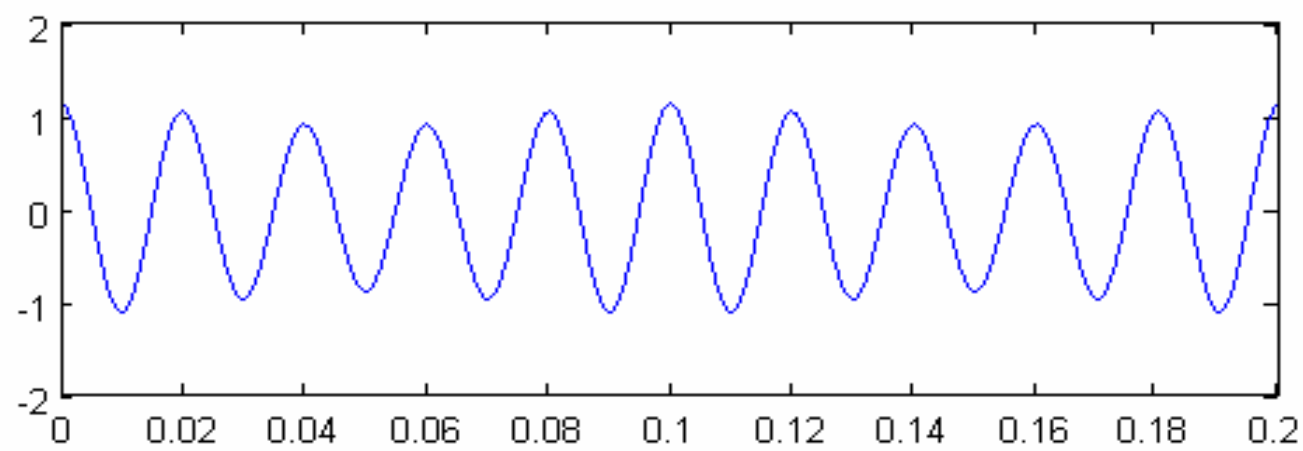
- **波形:**

$$x=1 \times (1+0.125 \times \cos(2 \times \pi \times 10 \times t)) \times (\cos(2 \times \pi \times 50 \times t))$$

- 对该波形分别取1、2、4、8、10、16、32周波进行谐波分析。

- **理论频谱（峰值）**

	50Hz	40Hz	60Hz
峰值	1	0.0625	0.0625



分析一

可见，要精确测试其频谱含量，谐间波的频率与FFT变换最小频率分辨的比值只有等于整数时才有可能。除此之外，均发生谐波的能量渗漏。

分析二

- 实际上，要做到精确测量波动性谐波频谱，必须事先知道调制波的频谱，但是在现实生活中，各类波动负荷的用电特性千变万化，要做到这点是不可能的，只有两条路可走：其一加大分析窗口宽度，但太大的窗口不仅大大增加监测设备的成本，而且指数倍的提高数据的容量，不利于显示操作，况且获取的大多数数据是没有实际意义的；其二选择一合理采样窗宽度，采取其他技术措施进行解决。

分析三

实际上，IEC61000-4-7 1991将谐波类型分为三种不同的谐波类型，即准稳态谐波、波动谐波、快速变化的谐波，并提出了不同类型谐波的分析窗口；但是在IEC61000-4-7 2002中已经不存在这些内容，而且明确规定基于DFT分析的采样窗宽度为10个工频周波（对于50Hz系统），窗口形状在同步状态下为矩形窗。其主要原因在于要准确区分各类谐波的类型在实际生活中的操作比较困难，而且对于同一种谐波类型也有一个窗口范围，从而采取不同的测量仪器将获取不同的结果，不利于实际操作。

建 议

- 1) 由于电力系统公共连接点一般不存在连续的、大波动的谐波现象，其谐波特性主要表现为整数倍的工频谐波，因此，电力系统公共连接点谐波测试可以基于1、2、4工频周波窗口的FFT算法。
- 2) 对于波动负荷的谐波测试，考虑到谐波能量的渗透性及其存在的间谐波，应采用基于8周波采样窗口的FFT算法或10周波采样窗口的DFT算法。对其测试数值应该进行能量泄漏评估，对整数倍谐波之间的间谐波能量，若该能量大于某一限定值，要求输出该频谱段的频谱数值，以期大大降低监测评估的数据量，同时获取有价值的信息。实际上，该类情况主要针对交流电弧炉负荷；

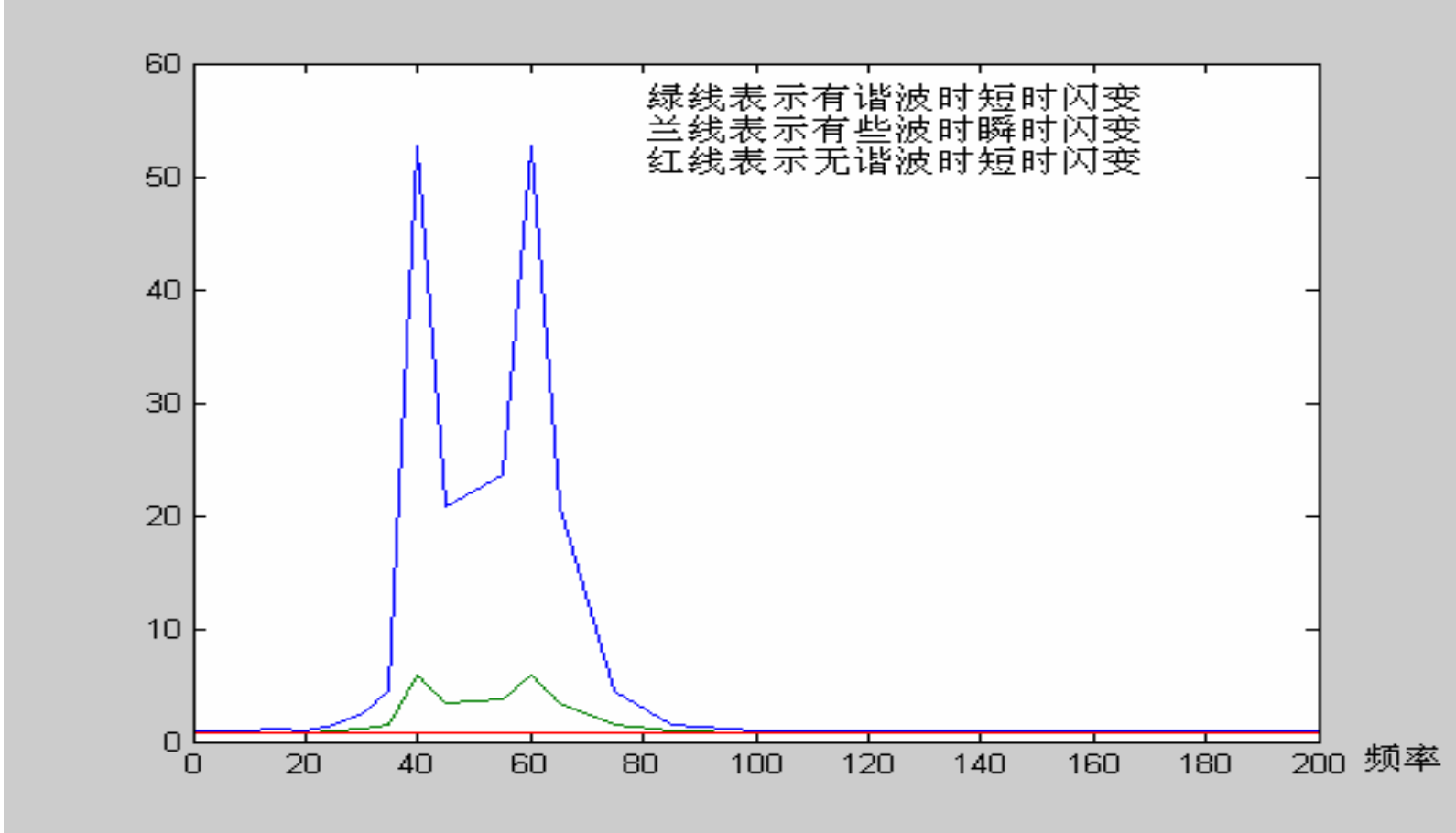
3. 2间谐波与闪变的危害分析

- 闪变是由非线性波动负荷产生的，即电压波动 $\Delta V(t)$ 的深度及其频度决定闪变的强度。由于闪变的衡量是以灯光照度的变化为基础的，因而增加了人的感觉因素，也就是增加了仅人能够感觉得到的频度对闪变有直接贡献，由于频度的关系，因而与谐波、间谐波、次谐波产生了某种联系。根据IEC及UIE的测定分析，仅0.05~35HZ的电压波动对闪变有直接贡献，波动频率为8.8HZ时对闪变的贡献最大。IEC根据相关试验数据，在对闪变的物理过程分析的基础上，制定了闪变测试的详细方法及其步骤。这里要分析的主要问题是：在载波信号中若伴随谐波分量，到底会对闪变的测量产生什么样的影响呢？（调制波中谐波成分对闪变的影响可依据同强度同频度的正弦调制波与方波进行比较说明）。

载波与闪变

- 分析对于同一个调制波，不同的载波对闪变的影响。
- 举例：设调制波为： $m \cdot \cos(2 \times \pi \times 8.8 \times t)$ ， $m = 0.125\%$ 为相对于载波幅值的调制幅度百分比。载波为： $100 \cdot (\cos(2 \times \pi \times f \times t) + d \times \cos(2 \times \pi \times f_s \times t))$ ， $f = 50\text{Hz}$ 为载波主频率， $d = 1\%$ 为频率为 f_s 的谐波占基波的百分比，在 f_s 按下表取值情况下的瞬时闪变 $S(t)$ 、短时闪变结果如下：

谐波频率 f_s (HZ)	瞬时闪变S	短时闪变Pst
0.5	0.9804~1.0438	0.7269
8.8	0.9803~1.045	0.7274
15	1.0989~1.0575	0.7309
20	1.0478~1.1305	0.7546
25	1.40571.5335	0.8775
30	2.5~2.722	1.1691
35	4.42~4.82	1.5562
40	52.8~68.5	5.8034
45	20.75~23.15	3.4047
55	23.63~29.3	3.7975
60	52.8~68.5	5.8034
65	20.74~23.15	3.4047
75	4.42~4.82	1.5562
85	1.40571~1.5335	0.8775
100	1.0471~1.1296	0.7544
115	0.9813~1.0429	0.7269
150	0.98145~1.042	0.7267
200	0.98145~1.042	0.7267



上述现象的进一步分析

- 根据IEC 61000-4-15的平方解调方法，设分析的信号
$$U(t)=A \times (1+m \times \cos(\Omega t)) \times (\cos(\omega t)+d \times \cos(\omega_n t))$$

式中：A工频载波电压的幅值

d 载波电压中 ω_n 次谐波占工频的百分数

m调幅波电压占工频幅值的百分比

Ω 调幅波频率

ω 工频角频率

ω_n 谐波角频率

- 则：平方解调后的信号的幅值及其对应频率如下表
(不包括直流分量)：

角频率	幅值(无谐波时)	幅值(有谐波 w_n 时)
Ω	mA^2	$mA^2(1+d^2)$
2Ω	$m^2A^2/4$	$(m^2A^2/4)(1+d^2)$
$2w$	$A^2(1+m^2/2)/2$	$(A^2(1+m^2/2)/2)(1+d^2)$
$2(w+\Omega)$	$m^2A^2/8$	$(m^2A^2/8)(1+d^2)$
$2(w-\Omega)$	$m^2A^2/8$	$(m^2A^2/8)(1+d^2)$
$2w+\Omega$	$m^2A^2/2$	$(m^2A^2/2)(1+d^2)$
$2w-\Omega$	$m^2A^2/2$	$(m^2A^2/2)(1+d^2)$
$2w_n$		$A^2 d^2 (1+m^2/2)/2$
$2(w_n+\Omega)$		$m^2A^2 d^2/8$
$2(w_n-\Omega)$		$m^2A^2 d^2/8$
$2w_n+\Omega$		$m^2A^2 d^2/2$
$2w_n-\Omega$		$m^2A^2 d^2/2$
$W+wn$		$A^2d(1+m^2/2)$
$w-wn$		$A^2d(1+m^2/2)$
$W+wn+\Omega$		$m A^2d$
$W+wn-\Omega$		$m A^2d$
$W+wn+2\Omega$		$m^2 A^2d/4$
$W+wn-2\Omega$		$m^2 A^2d/4$
$W-wn+\Omega$		$m A^2d$
$W-wn-\Omega$		$m A^2d$
$W-wn+2\Omega$		$m^2 A^2d/4$
$W-wn-2\Omega$		$m^2 A^2d/4$

上述现象的进一步分析

- 同样对上述分析实例，取在载波中含有**1%**的**40Hz**谐波情况进行分析。平方解调后，经过**0.05~35Hz**滤波，不仅剩余峰值为**0.125V**的**8.8Hz**波动量，其波动为**0.25%**，同时还将产生w-wn频谱的成分，即**10Hz**的分量，其峰值为**1V**，波动为**2%**，因此其闪变测量值应该是由这两个分量共同作用的结果。
- **10Hz**的调制波其波动量为**0.262%**时理论瞬时闪变视感度为**1**，短时闪变值为**0.714**。当其波动量增加为**2%**，即增加**7.6336**倍时，短时闪变理论值应为：**5.45**。可见，此时的闪变测试值已经表现为由平方解调后产生的**2%**的**10Hz**波动量主要产生，该理论分析与上述仿真结论基本吻合。
- 同样的分析方法用于载波中其他频率含量的情况一样合适。

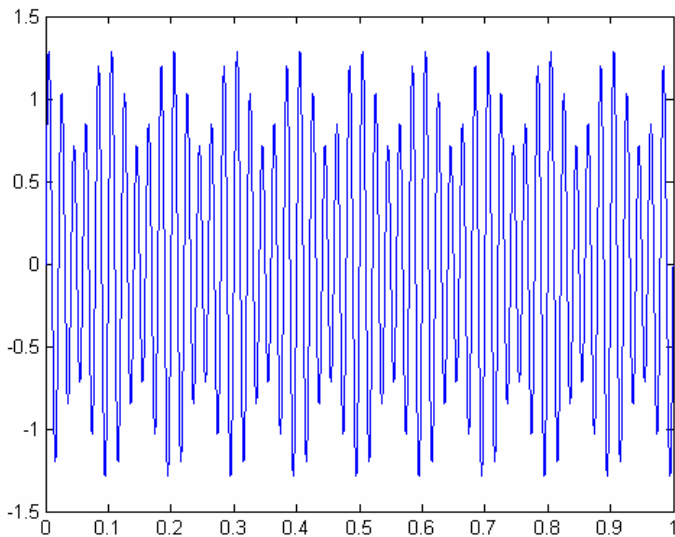
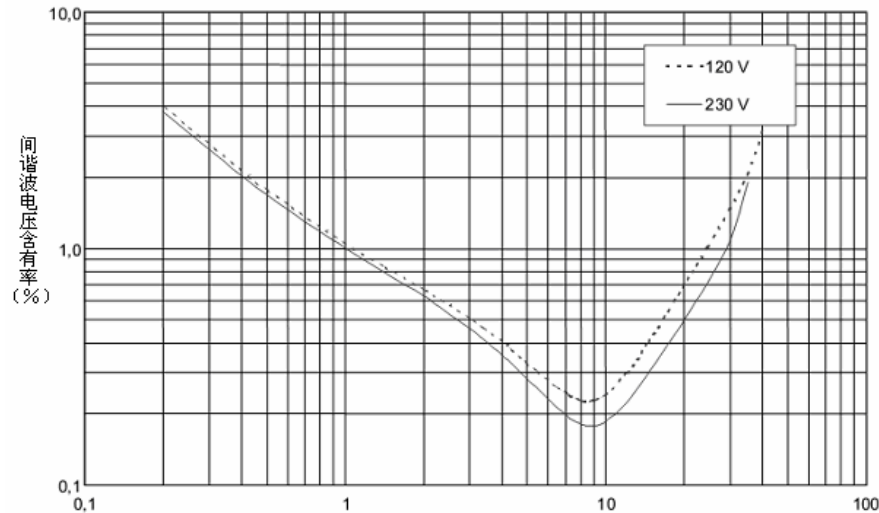
结 论

- 1、 载波中频率大于**100HZ**的谐波、间谐波对闪变没有直接贡献。
- 2、 载波中频率小于**100HZ**的间谐波、次谐波对应不同的调制波对闪变有直接贡献。
- 3、 经分析，间谐波、次谐波含量小于**0.01%**以下时，对闪变的贡献才会表现不很突出。

4、相关国际（地区组织）间谐波标准参考

- IEC61000-2-2 公用电网低压供电系统低频传导干扰与传输信号兼容限值
- IEC61000-3-6 连接与中压、高压、超高压系统的干扰负荷的谐波发射限值评估
- IEC61000-4-7 谐波、间谐波测量及其监测仪器通用导则
- IEC61000-4-30 电能质量测量方法
- IEEE 间谐波工作组文件（draft1/draft2）
- G5/4 英国输配电系统谐波电压规划水平

4.1 IEC61000-2-2



间谐波次数 i_h	系统频率 50 Hz, 标称电压 230V	
	间谐波频率 f_{ih} (Hz)	间谐波电压含有率 (%)
$0,2 < i_h \leq 0,6$	$10 < f_{ih} \leq 30$	0,51
$0,60 < i_h \leq 0,64$	$30 < f_{ih} \leq 32$	0,43
$0,64 < i_h \leq 0,68$	$32 < f_m \leq 34$	0,35
$0,68 < i_h \leq 0,72$	$34 < f_{ih} \leq 36$	0,28
$0,72 < i_h \leq 0,76$	$36 < f_{ih} \leq 38$	0,23
$0,76 < i_h \leq 0,84$	$38 < f_{ih} \leq 42$	0,18
$0,84 < i_h \leq 0,88$	$42 < f_{ih} \leq 44$	0,18
$0,88 < i_h \leq 0,92$	$44 < f_{ih} \leq 46$	0,24
$0,92 < i_h \leq 0,96$	$46 < f_{ih} \leq 48$	0,36
$0,96 < i_h < 1,04$	$48 < f_{ih} \leq 52$	0,64
$1,04 < i_h \leq 1,08$	$52 < f_{ih} \leq 54$	0,36
$1,08 < i_h \leq 1,12$	$54 < f_{ih} \leq 56$	0,24
$1,12 < i_h \leq 1,16$	$56 < f_{ih} \leq 58$	0,18
$1,16 < i_h \leq 1,24$	$58 < f_{ih} \leq 62$	0,18
$1,24 < i_h \leq 1,28$	$62 < f_{ih} \leq 64$	0,23
$1,28 < i_h \leq 1,32$	$64 < f_{ih} \leq 66$	0,28
$1,32 < i_h \leq 1,36$	$66 < f_{ih} \leq 68$	0,35
$1,36 < i_h \leq 1,40$	$68 < f_{ih} \leq 70$	0,43
$1,4 < i_h \leq 1,8$	$70 < f_{ih} \leq 90$	0,51

两个不同频率正弦波电压合成时，其频率（例如公用电网中间谐波频率和基波频率）之差的绝对值

4.2 IEC 61000-3-6

该标准保守地给出中压、高压、超高压系统间谐波的规划限值水平为各间谐波含有率不大于0.2%，其主要出发点在于考虑到间谐波的下述危害：

- 1) 基波频率两倍范围内的各次间谐波含有率不得大于0.2%，主要限值其闪变效应。
- 2) 当与控制信号对应的间谐波含有率大于0.3%时，ripple control receivers的正确动作将会收到干扰。所谓ripple control，依据GB/T 15148—94，电力负荷控制系统通用技术条件，即为音频电力负荷控制，其定义为：利用高、低压配电线传输音频控制信号，实现电力负荷控制的技术，信号频率一般为167~1600Hz。
- 3) 2.5kHz范围内的各次间谐波含有率不得大于0.5%，否则将会引起电视机设置改变，感应旋转电机产生震动或噪音增大，频率继电器误动作；
- 4) 频率在2.5kHz ~5kHz范围内的各次间谐波含有率不得超过0.3%，否则将引起无线电接收机或接收装置产生可闻噪音；

4.3 IEEE间谐波工作组文件

1) 建议1

- 20~90Hz范围内的间谐波限值依据 IEC 61000-2-2 (2002版) 思想, 主要关心其闪变效应
- 90Hz~3 kHz 的各次间谐波依据其系统电压等级, 其含有率可限制在1%、2%、3%范围内。其目的在于保护低频电力载波信号 (low frequency power line carrier), 这些信号的频率一般在3次谐波与5次谐波之间, 含有率在1~5%范围内;
- 应用在系统的无源滤波器往往对某次间谐波发生放大, 因此从滤波器设计者的角度希望将间谐波水平降低到一个较低的程度。

2) 建议2

- 在140 Hz 范围内的间谐波限值取0.2%
- 140 Hz 到某一频率之间（例如800 Hz ）的间谐波限制在1%范围内，其目的在于保护低频载波信号（low frequency PLC ），同时避免发生并联谐振现象；
- 对于更高频率的间谐波，将其限值规定为对应谐波限值的某一水平（例如20%），其目的在于保护高频载波信号，同时避免滤波器并联谐振。

4.4 英国G5/4

G5/4:次谐波和间谐波电压限值

频率 (Hz)	<80	80	90	>90和<500
电压含有率 (%)	0.2	0.2	0.5	0.5

4.5 欧洲EN50160

- EN50160并未采纳电能质量的概念，而是应用电压特征（voltage-characteristics）的概念。该标准给出了系统正常运行方式下中低压供电系统公共连接点的电压特征水平。很遗憾未给出间谐波限值水平（the interharmonic limitation is under consideration）。
- 但标准提出间谐波的主要危害是闪变效应及对ripple control system的干扰。

4.6 Mains signaling voltage

电力输配电系统在传输电力的同时，也附带的传输相关控制、通讯、数据信号，例如负控（load control）、遥测信号（remote reading of meters）等等。这些附带传输的信号即为main signaling。一般来说，这些信号介于110 Hz ~ 500 kHz之间。信号电压在广泛存在于系统的高、中、低等各级电网。根据其频率范围或信号可分为下述四类：

a) 音频电力负荷控制系统

音频电力负荷控制系统（Ripple control systems）也称作低频电力载波系统（low-frequency power-line carrier systems）。其信号为正弦波，频率介于110 Hz ~ 2 000 Hz之间，大多在110 Hz ~ 500 Hz；

b) 中频电力载波系统

中频电力载波系统（Medium-frequency power-line carrier systems）信号同样为正弦信号，其频率介于3 kHz ~ 20 kHz，大多工作在6 kHz ~ 8 kHz之间。此类系统一般为电力系统内部专用。目前还处于进一步开发阶段，还未有统一规范。

c) 无线电频率电力载波系统

无线电频率电力载波系统（Radio-frequency power-line-carrier systems）应用正弦波信号，频率介于20 kHz ~ 150 kHz（有些国家达到500 kHz）。

d) Mains-mark systems

此系统主信号电压为非正弦波。

5、标准主要内容解释

5. 1 范围

5. 2术语和定义

5.3 限值

- 限值的取舍原则
- 电压等级的划分及其限值
- 关于间谐波限值的分配

$$U_{ih} = \sqrt[3]{U_{ih1}^3 + U_{ih2}^3 + \dots + U_{ihk}^3}$$

$$\sqrt[3]{2x^3} = A \quad x = \frac{A}{\sqrt[3]{2}} = \frac{A}{1.26}$$

单一用户间谐波电压含有率限值 (%)

频率 (Hz)	<100	100~800
限值 等级		
1000V及以下	0.16	0.4
1000V以上	0.13	0.32

间谐波电压含有率限值 (%)

频率 (Hz)	<100	100~800
限值 电压等级		
1000V及以下	0.2	0.5
1000V以上	0.16	0.4

注：频率800Hz以上的间谐波电压限值还处于研究中。频率低于100Hz限值的主要依据见附录A。

5.4 测量取值和测量条件

间谐波测量的频率分辨率为5Hz，测量采样窗口宽度为10个工频周期。这些内容，均采纳了IEC 61000-4-7/30的相关规定

$$U_{ih} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m u_{ih.k}^2} \quad 6 \leq m \leq 15$$

取值方法主要基于下述考虑：

- 1) 谐波、间谐波的热效应；
- 2) 为了区别暂态现象和谐波、间谐波（暂态现象中电压、电流也包含丰富的谐波成分，但是其频谱不是与电网的基波相关的，因此，不认为是谐波现象，例如短路瞬间的电压、电流等）

5.4.1 间谐波测量的电气环境要求

首先分析我国电能质量限值标准体系中关于各指标测量条件的相关规定：

- 1) GB/T14549附录D规定的相关测量条件：要求谐波电压（或电流）测量应选择在：
——电网正常供电时可能出现的最小运行方式下，且谐波源工作周期中产生的谐波量最大的时间段内进行；
——当测量点附近安装有电容器时，应在电容器组的各种运行方式下进行测量；
- 2) GB/T15543三相不平衡度，该标准6.1规定的测量条件为：测量应在电力系统正常运行的较小方式下，不平衡负荷处于正常、连续工作状态下进行，并保证不平衡负荷的最大工作周期包含在内。
- 3) 闪变GB/12326—2000规定的闪变的测量应在下述条件下进行：
——电力系统正常运行的较小方式下，波动负荷变化最大的工作周期内；
——三相负荷不平衡时应在三相测量值中取最严重的一相值；

新修订的GB/T 12326规定：电力系统正常运行的较小方式下，波动负荷处于正常、连续工作状态，以一天（24小时）为测量周期，并保证波动负荷的最大工作周期包含在内。

值得一提的是IEC电磁兼容标准中没有上述要求，G5/4、EN50160标准也没有这样的规定。可以说，这一要求是我国电能质量限值标准体系的基础。笔者认为，这一规定的目的在于要求获取这一指标的最严重情况，这点不同于IEC电磁兼容发射水平、规划水平、兼容水平的限值体系。

基于上述分析，本标准关于间谐波的测量条件规定：间谐波的评估测量要求在系统正常运行的最小方式下，间谐波发生最大的情况下测量。

5.4.2 间谐波测量数据的简约方法

间谐波的测量可以在3s测量结果的基础上，综合出3min、10min或2h的测量值。综合方法为取所选时间间隔内（例如3min）所有3s测量结果的平方

算术和平均取平方根

$$U_{ih} = \sqrt{\frac{1}{60} \sum_{k=1}^{60} u_{ih,k}^2}$$

(3min) (3s)

当系统条件不符合要求时（大于正常最小方式），可按短路容量折算结果（即将5.4的结果乘以实际短路容量和最小短路容量之比）

支持上述规定一方观点：

- 1) 该方法是IEC电磁兼容标准IEC 61000-4-30谐波、间谐波的测量给出的公式，应该坚持；
- 2) 当短路容量不满足正常运行的最小运行方式时，应该按短路容量对间谐波电压含有率的测量结果进行折算。

反对上述规定一方观点：

- 公式不符合我国电能质量监测条件的基本要求，即不符合要求在“间谐波发生最大的情况下测量”的基本要求；
- 至于IEC 61000-4-7（30）电磁兼容标准给出的数据综合方法必须坚持的观点是否符合我国电能质量限值标准体系值得认真考虑。试问：欧洲EN50160为什么不采取这种方法，而是采用取平均值的办法？我国国家标准三相不平衡度测量的取值方法为什么不采纳这种方法，而是取平均值的方法？电压波动闪变国家标准为什么不采纳IEC电磁兼容短时闪变的指标而删除之？美国闪变指标为什么基于110V电压系统而不采纳IEC 230V系统？等等。因此应该结合各国实际情况进行处理。
- 间谐波电压的测量结果不能像谐波电流那样根据短路容量进行折算。

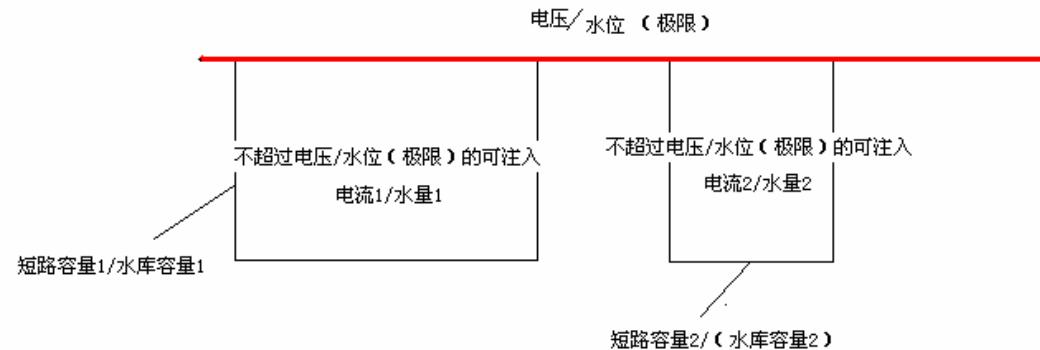
该观点方要求上述规定修改为：

修改1：取消间谐波电压测量值依据短路容量的折算规定，将监测数据的方均根综合方法修改为最大值综合方法，即：间谐波的测量可以在3s测量结果的基础上，综合出3min（若需要，也可选10min或2h）的测量值。综合方法为取所选时间间隔内（例如3分钟）测量结果的最大值（符合要求在“间谐波发生最大的情况下测量”的基本要求）；

修改2：若确实间谐波电压测量结果按短路容量的折算思路是正确的，则修改为：间谐波的测量可以在3s测量结果的基础上，综合出3min（若需要，也可选10min或2h）的测量值。综合方法为取所选时间间隔内（例如3分钟）测量结果的最大值（符合要求在“间谐波发生最大的情况下测量”的基本要求）；当系统条件不符合要求时（大于正常最小方式），可按短路容量折算结果（即将上述结果乘以实际短路容量和最小短路容量之比）。（满足在系统正常运行的最小方式下测量的要求）

为什么间谐波电压测量结果不能按短路容量进行折算呢？该观点方的主要理由阐述如下

- 首先，不同于谐波电流，谐波、间谐波电压属于“势”特性，是不允许以短路容量的大小进行折算（换算的）



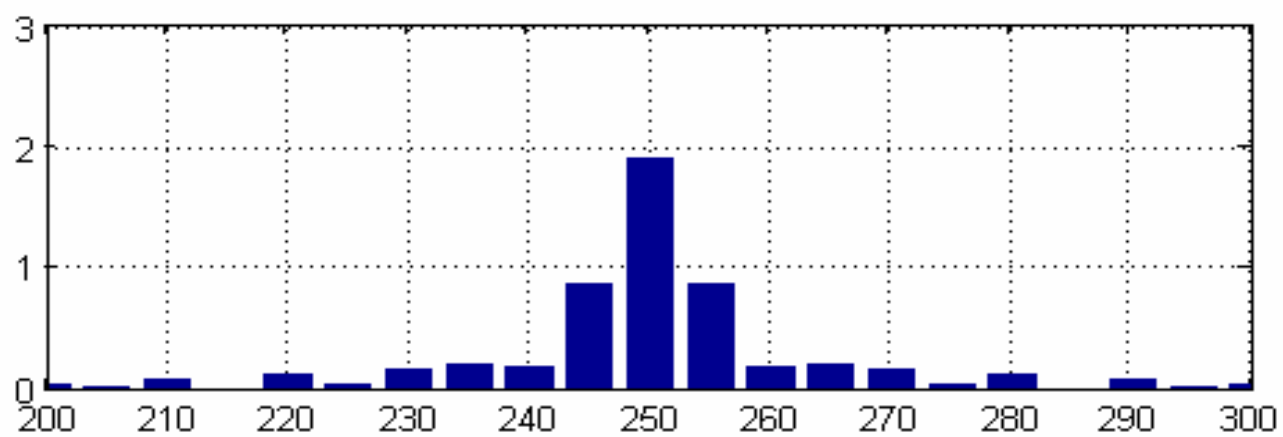
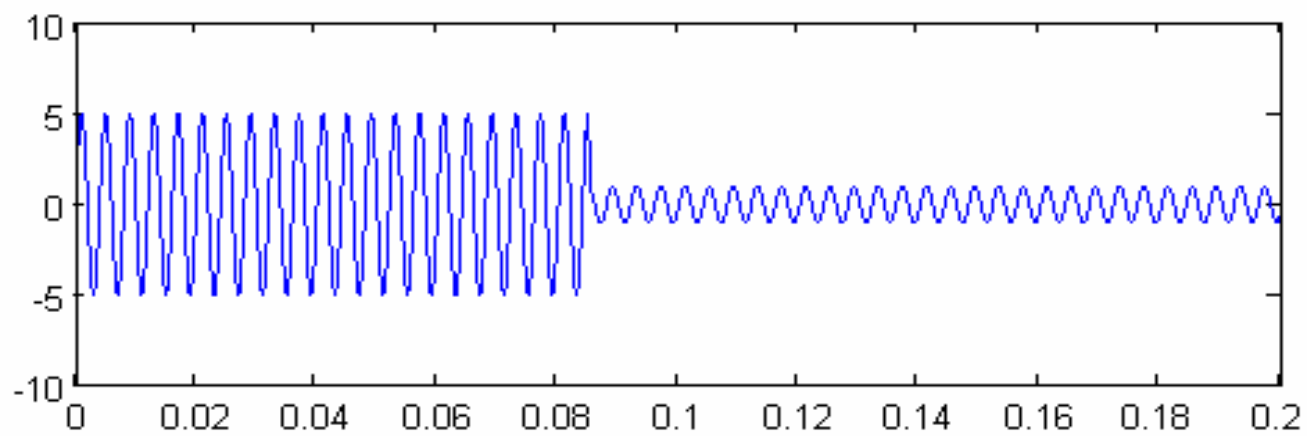
因此：电流（水量）限值是可以以短路容量（水库容量）进行变化的，但电压（水位）限值是不能遂其变化的。

- 其次，若间谐波电压限值随短路容量可以变化，那么，间谐波电压含有率限值的规定是基于哪一个基准短路容量的呢？
- 第三，若间谐波电压含有率的测量值需要随短路容量折算，那么，三相不平衡度、闪变、谐波电压的测量值是否也要求按短路容量折算呢？这些参数的测量条件也都要求在系统正常运行的最小方式下测量。因为对同样的干扰源，短路容量越小，三相不平衡度指标、闪变指标（电压波动指标）、谐波电压指标越严重，反之依然。

5.5 谐波测量的集合概念

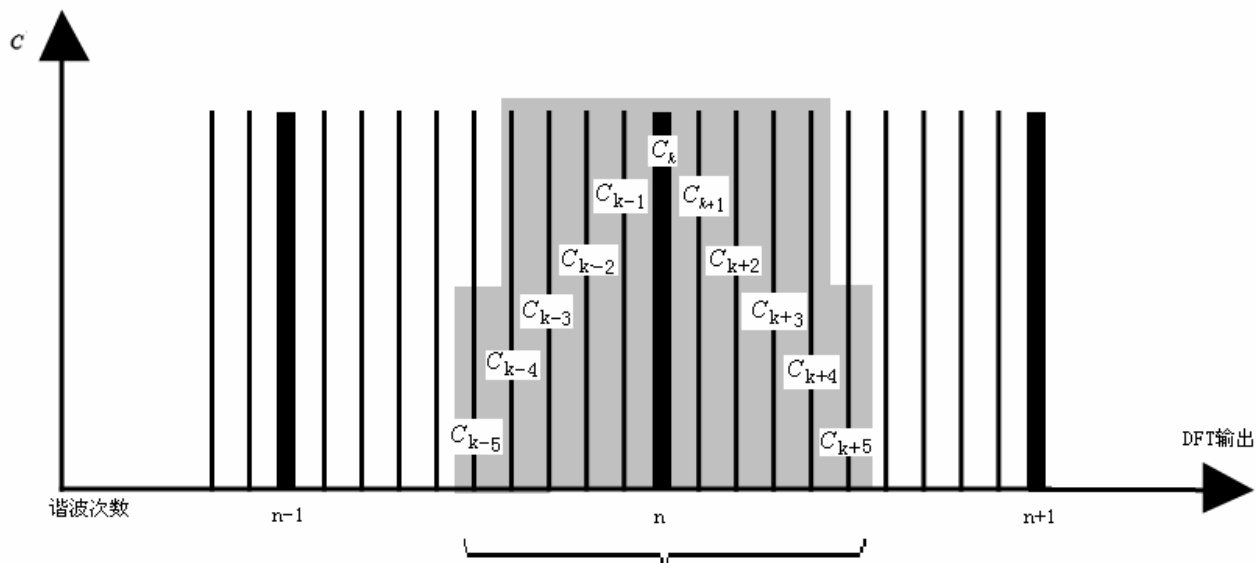
算例一 存在1次波动的5次谐波电流

- $T=0.02\text{s}$, $t_1=4.25T$, $t_2=10T$, $0\sim t_1$ 时间5次谐波电流有效值 3.536A , $t_1\sim t_2$ 时间为 0.7071A 。
- 对此波形取10个工频周波进行FFT分析



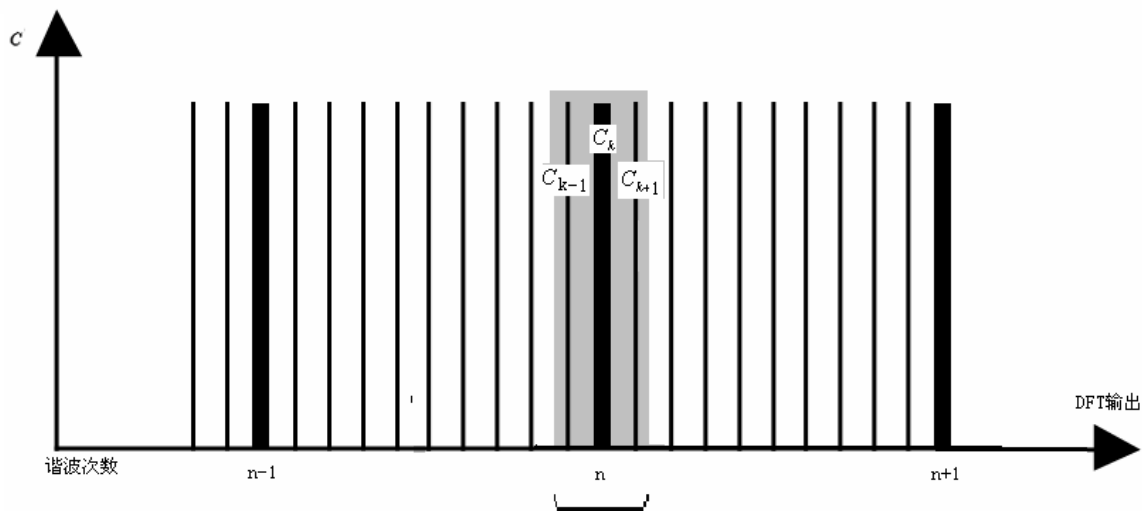
结果分析

- 结果如下：
- **5次谐波电流仅为1.9116A；**
- 实际上，根据有效值算法，其实际有效值应该为**2.3678A**，误差为：**19.3%**。
- 可见一个纯**5次谐波**，当具有波动特性时，通过**FFT**变换后其能量向两侧频段进行了渗漏。



N次
谐波集

$$G_{g,n} = \sqrt{\frac{C_{k-5}^2}{2} + \sum_{i=4}^4 C_{k+i}^2 + \frac{C_{k+5}^2}{2}}$$



N次
谐波子集

$$G_{s,g,n} = \sqrt{\sum_{i=-1}^1 C_{k+i}^2}$$

渗漏能量收集

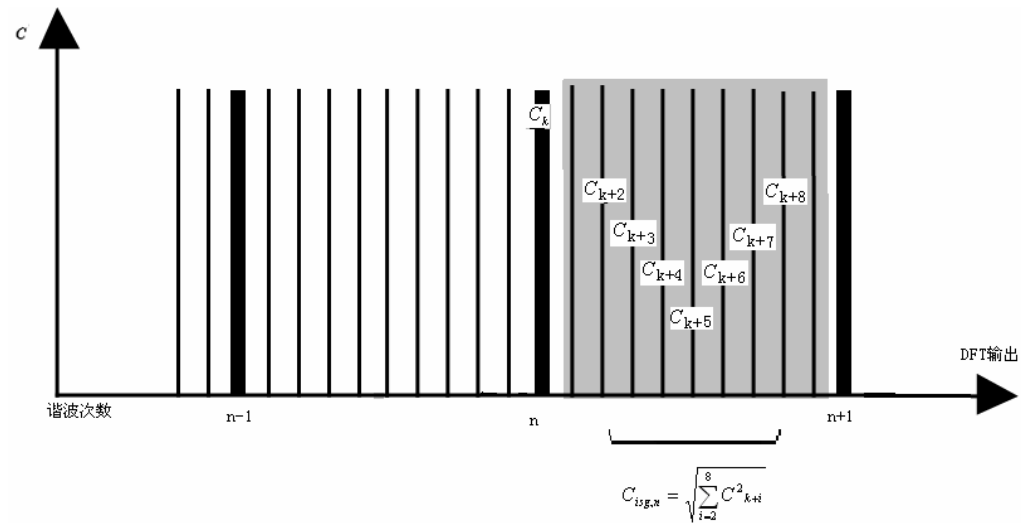
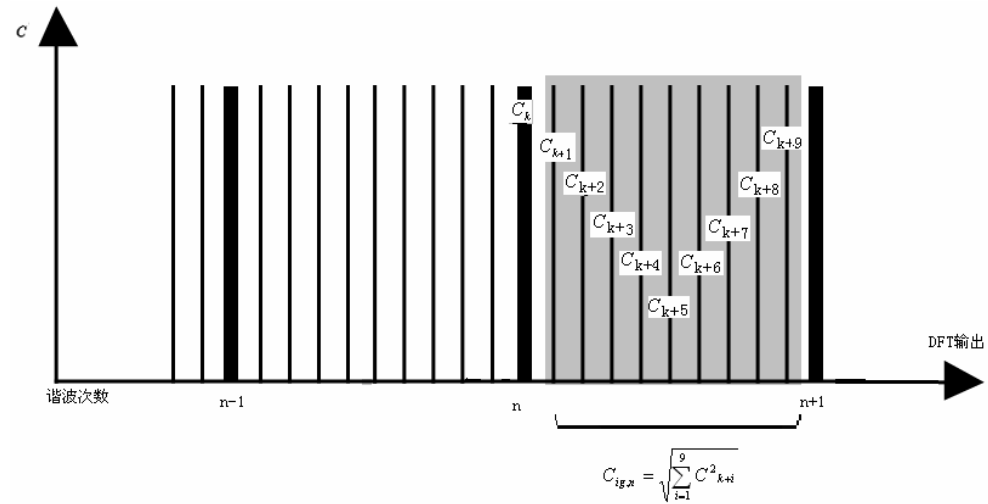
- 通过下述方法对发散的能量进行回收，从而获取误差较小的5次谐波电流。
- 全集： $I_{5g}^2 = C_{k-5}^2/2 + \sum_{-4}^4 C_{(k-i)}^2 + C_{k+5}^2/2$
- 子集： $I_{5sg}^2 = C_{k-1}^2 + C_{k+1}^2 + C_{k-1}^2$

	FFT	子集	全集	实际值
结果	1. 9116	2. 278	2. 334	2. 3678
误差 (%)	19. 3	3. 8	1. 43	0

感觉与结论

- 通过上述算例1、2、3、4分析可见：
 - 1) 在采用FFT分析波动性谐波时，该次谐波的能量将会不同程度的向两侧频段渗漏；
 - 2) 波动幅度越大，渗漏越厉害。
 - 3) 波动频度越大，渗漏越厉害。
 - 4) 对于电力系统公共连接点，一般不存在大幅度、高频度连续的波动现象，因此FFT变换的直接结果基本可以反映实际情况，也可通过子集法获取较精确的结果。
- 4) 对于波动性负荷用户，必须采取集合的形式对渗漏的能量进行收集，方可获取较精确的结果。

5.6 间谐波检测的集合概念



5.7 能量集合的理论基础

根据Parseval's (巴塞夫) 理论, 对于连续函数 $g(t)$, $G(j\omega)$

为它的傅立叶变换函数, 则:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |g(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |G(j\omega)|^2 d\omega$$

$g(t)$: 时域函数

$G(j\omega)$: 频域函数

$\omega =$

能量集合的理论基础

如果函数 $g(t)$ 是非周期的，则其频谱为连续；若 $g(t)$ 为周期函数，则函数可以用一个有限时间段 T_w 表示，此时，其频谱将为不连续频谱，仅包含 $f_w = \frac{1}{T_w}$ 频谱分量，该段时间内时域能量与其FFT变换后的频谱能量和相等，即：

$$\frac{1}{T_w} \int_{-T_w/2}^{T_w/2} |g(t)|^2 dt = \sum_{k=-\infty}^{\infty} |G_k|^2$$

考虑到FFT变换的特点，上式可表示为：

$$\frac{1}{T_w} \int_{-T_w/2}^{T_w/2} |g(t)|^2 dt = G_0^2 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} |G_k|^2 = \sum_{k=0}^{\infty} |C_k|^2$$

能量集合的理论基础

- 若采用数字技术，设 T_w 内采样点数为 N ，则上式表示为：

- $$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i)^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N/2} |C_k|^2}$$

能量集合的理论基础

- 1、时域能量能够被频域能量准确评估
- 2、当信号包含的谐波频谱不等于FFT变换最小频率分辨率的整数倍时，只可能出现某次谐波的数值有差别，但整个频谱几个仍正确代表时域内信号的能量。
- 3、因此，对于间谐波可以采用集合的方式评估两个频谱段间的频谱能量，以判断时域信号中这些谐波的大小。

6、标准的技术经济评价

- 公用电网间谐波国家标准属于首次制定，加之间谐波的诸多危害在世界范围内还处于待研究的状态，因此不可能期望这样一部标准规范包罗万象的间谐波问题，也不可能要求这样一部标准在技术上是多么成熟的。
- 该标准的颁布如果能引起电力供求双方在实践中关注间谐波问题就已经是很好的事情了。