



中华人民共和国国家标准化指导性技术文件

GB/Z 17624.4—2019/IEC/TR 61000-1-4:2005

电磁兼容 综述 2 kHz 内限制设备 工频谐波电流传导发射的历史依据

**Electromagnetic compatibility—General—Historical rationale for the
limitation of power-frequency conducted harmonic current emissions from
equipment, in the frequency range up to 2 kHz**

[IEC/TR 61000-1-4:2005, Electromagnetic compatibility(EMC)—Part 1-4:
General—Historical rationale for the limitation of power-frequency
conducted harmonic current emissions from equipment, in the
frequency range up to 2 kHz, IDT]

2019-06-04 发布

2019-06-04 实施

国家市场监督管理总局 发布
中国国家标准化管理委员会

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 概述	2
5 标准中与监管法规相关的可接受条款	3
6 IEC 61000-3-2 及其前身的历史	3
6.1 1960 年以前	3
6.2 1960~1975 年	3
6.3 1975~1982 年	4
6.4 1982~1995 年	4
6.5 1995~2000 年	6
6.6 千禧年修改单	6
6.7 IEC 61000-3-2 的未来发展	7
7 IEC 61000-3-12 及其前身的历史	7
7.1 1989~1998 年	7
7.2 1998 年以后	7
8 制定 IEC 61000-3-2 限值时考虑的经济因素(1995 年版本及 2000 年修改单文本完成以前)	7
附录 A (资料性附录) 兼容水平和补偿因子	9
附录 B (资料性附录) A 类限值与含相控调光器的白炽灯在 90°触发角谐波频谱的比较	12
附录 C (资料性附录) C 类限值(GB 17625.1 中表 2)与含感性镇流单元放电灯 谐波频谱的比较	13
附录 D (资料性附录) D 类限值与导通角为 35°和 65°的单相电容滤波镇流器谐波频谱的比较	14
附录 E (资料性附录) IEC 61000-3-2 千禧年修正案完成以前制定限值时考虑的经济因素	15
附录 F (资料性附录) IEC 61000-3-2 修订的概要计划	16
附录 G (资料性附录) 推导 IEC 61000-3-12 限值	18
附录 H (资料性附录) 使用总谐波畸变和部分加权谐波畸变概念的原因解释	28
参考文献	30
图 A.1 典型系统中变压器阻抗上谐波电压降的分配	9
图 B.1 A 类限值与调光器谐波频谱的比较	12
图 C.1 C 类限值与放电灯谐波频谱的比较	13
图 D.1 D 类限值与单相 230 W 电容滤波镇流器谐波频谱的比较	14
图 E.1 符合兼容水平的总成本折中概念示意图	15

图 H.1	低压系统的示意图和等效电路图	28
图 H.2	作为短路比 R_{sc} 函数的相对总畸变加权值“tdw”	29
表 A.1	补偿因子	10
表 A.2	$k_{p,h}$ 的子因子	10
表 G.1	依赖于接入干扰负载的连接点 x 的相对总畸变加权值	21
表 G.2	IEC 61000-3-12 中的限值(列 2 和列 4)与由式(G.8)得到的近似值 (列 3 和列 5)的比较	22
表 G.3	兼容水平	24
表 G.4	一台单相设备的最大谐波电流和谐波电压(引自 IEC 61000-3-12 表 2)	24
表 G.5	一台平衡三相设备的最大谐波电流和谐波电压(引自 IEC 61000-3-12 表 3)	25
表 G.6	一台平衡三相设备的最大谐波电流和谐波电压(引自 IEC 61000-3-12 表 4)	25
表 G.7	n 台单相设备的最大谐波电流和谐波电压(引自 IEC 61000-3-12 表 2)	25
表 G.8	n 台平衡三相设备的最大谐波电流和谐波电压(引自 IEC 61000-3-12 表 3)	26
表 G.9	n 台平衡三相设备的最大谐波电流和谐波电压(引自 IEC 61000-3-12 表 4)	26
表 G.10	n 台单相设备的最大谐波电流和谐波电压(引自 IEC 61000-3-12 表 2)	26
表 G.11	n 台平衡三相设备的最大谐波电流和谐波电压(引自 IEC 61000-3-12 表 3)	27
表 G.12	n 台平衡三相设备的最大谐波电流和谐波电压(引自 IEC 61000-3-12 表 4)	27

前 言

《电磁兼容 综述》目前包括以下部分：

- GB/T 17624.1—1998 电磁兼容 综述 电磁兼容基本术语和定义的应用与解释；
- GB/Z 17624.2—2013 电磁兼容 综述 与电磁现象相关设备的电气和电子系统实现功能安全的方法；
- GB/Z 17624.4—2019 电磁兼容 综述 2 kHz 内限制设备工频谐波电流传导发射的历史依据。

本部分为《电磁兼容 综述》的第 4 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本部分使用翻译法等同采用 IEC/TR 61000-1-4:2005《电磁兼容(EMC) 第 1-4 部分:综述 2 kHz 内限制设备工频谐波电流传导发射的历史依据》。

与本部分中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下：

- GB 17625.1—2012 电磁兼容 限值 谐波电流发射限值(设备每相输入电流 ≤ 16 A)(IEC 61000-3-2:2009,IDT)；
- GB/T 17625.2—2007 电磁兼容 限值 对每相额定电流 ≤ 16 A 且无条件接入的设备在公用低压供电系统中产生的电压变化、电压波动和闪烁的限制(IEC 61000-3-3:2005,IDT)；
- GB/Z 17625.4—2000 电磁兼容 限值 中、高压电力系统中畸变负荷发射限值的评估(IEC 61000-3-6:1996,IDT)；
- GB/Z 17625.6—2003 电磁兼容 限值 对额定电流大于 16 A 的设备在低压供电系统中产生的谐波电流的限制(IEC TR 61000-3-4:1998,IDT)；
- GB/T 17625.7—2013 电磁兼容 限值 对额定电流 ≤ 75 A 且有条件接入的设备在公用低压供电系统中产生的电压变化、电压波动和闪烁的限制(IEC 61000-3-11:2000,MOD)；
- GB/T 17625.8—2015 电磁兼容 限值 每相输入电流大于 16 A 小于等于 75 A 连接到公用低压系统的设备产生的谐波电流限值(IEC 61000-3-12:2004,IDT)；
- GB/T 17626.13—2006 电磁兼容 试验和测量技术 交流电源端口谐波、谐间波及电网信号的低频抗扰度试验(IEC 61000-4-13:2002,IDT)；
- GB/T 18039.3—2017 电磁兼容 环境 公用低压供电系统低频传导骚扰及信号传输的兼容水平(IEC 61000-2-2:2002,IDT)。

本部分做了下列编辑性修改：

- 为与我国标准体系一致，本部分名称改为《电磁兼容 综述 2 kHz 内限制设备工频谐波电流传导发射的历史依据》；
- 增加了说明性的文字，以便理解和使用：
 - 第 1 章范围中的注 2；
 - 第 4 章概述中图 1 的注；
 - 第 5 章标准中与监管法规相关的可接受条款中的注。

本部分由全国电磁兼容标准化技术委员会(SAC/TC 246)提出并归口。

本部分起草单位：苏州海关、中国电力科学研究院有限公司。

本部分主要起草人：扈罗全、万保权、尹婷、李妮。

电磁兼容 综述 2 kHz 内限制设备 工频谐波电流传导发射的历史依据

1 范围

《电磁兼容 综述》的本部分为指导性技术文件,回顾了电网上在 2 kHz 内工频谐波电流传导发射的来源及其影响,说明了 IEC 61000-3-2:2000+AMD1:2001 以及 IEC 61000-3-12:2004 中设备现有发射限值的推导过程。

本部分中的概念适用于所有低压交流供电系统,但数据仅适用于欧洲 230 V/400 V、50 Hz 供电系统。

注 1: 将来完成的 IEC 61000-3-2 和/或 IEC 61000-3-12 修改版本的限值阐述,将包含在本部分的新版本中。

注 2: 本部分的数据供 220 V/380 V、50 Hz 供电系统参考使用。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

IEC 61000-2-2:2002¹⁾ 电磁兼容(EMC) 第 2-2 部分:环境 公用低压供电系统低频传导骚扰及信号传输的兼容水平[Electromagnetic compatibility(EMC)—Part 2-2: Environment—Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems]

IEC 61000-3-2:2000²⁾ 电磁兼容(EMC) 第 3-2 部分:限值 谐波电流发射限值(设备每相输入电流 ≤ 16 A)[Electromagnetic compatibility(EMC)—Part 3-2: Limits—Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)³⁾]及其修改单 1(2001)

IEC 61000-3-3:1994 电磁兼容(EMC) 第 3-3 部分:限值 对每相额定电流 ≤ 16 A 且无条件接入的设备在公用低压供电系统中产生的电压变化、电压波动和闪烁的限制[Electromagnetic compatibility(EMC)—Part 3-3: Limits—Limitation of voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems for equipment with rated current ≤ 16 A⁴⁾]及其修改单 1(2001)

IEC 61000-3-4 电磁兼容(EMC) 第 3-4 部分:限值 对额定电流大于 16 A 的设备在低压供电系统中产生的谐波电流发射限制[Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 3-4: Limits—Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A]

IEC 61000-3-6 电磁兼容(EMC) 第 3-6 部分:限值 中压及高压供电系统中畸变负载发射限值

1) 本文件还参考了第一版 IEC 61000-2-2(1990)《电磁兼容(EMC) 第 2 部分:环境 第 2 分部分:公用低压供电系统低频传导骚扰及信号传输兼容水平》,之后被第二版所取代。

2) 本文件还参考了第一版 IEC 61000-3-2(1995)《电磁兼容(EMC) 第 3 部分:限值 第 2 分部分:谐波电流发射限值(设备每相输入电流 16 A)》和修改单 1(1995),之后被第二版及其修改单 2 取代。

3) 存在一个合并版本 2.2,包含了 IEC 61000-3-2:2000 及其修改单 1(2001)和修改单 2(2004)。

4) 存在一个合并版本 1.1,包含了 IEC 61000-3-3:1994 及其修改单 1(2001)《电磁兼容 第 3-3 部分:限值 对每相额定电流 ≤ 16 A 且无条件接入的设备在公用低压供电系统中产生的电压变化、电压波动和闪烁的限制》。

的评估[Electromagnetic compatibility(EMC)—Part 3: Limits—Section 6: Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems]

IEC 61000-3-11 电磁兼容(EMC) 第 3-11 部分:限值 公用低压供电系统中电压波动和闪烁的限值(额定电流 ≤ 75 A 且适用有条件连接的设备)[Electromagnetic compatibility(EMC)—Part 3-11: Limits—Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems—Equipment with rated current ≤ 75 A and subject to conditional connection]

IEC 61000-3-12 电磁兼容(EMC) 第 3-12 部分:限值 对每相输入电流 >16 A 且 ≤ 75 A 的设备在低压供电系统中产生的谐波电流的限值[Electromagnetic compatibility(EMC)—Part 3-12: Limits—Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current >16 A and ≤ 75 A per phase]

IEC 61000-4-13 电磁兼容(EMC) 第 4-13 部分:试验和测量技术 交流电源端口谐波、谐间波及电网信号的低频抗扰度试验[Electromagnetic compatibility(EMC)—Part 4-13: Testing and measurement techniques—Harmonics and interharmonics including mains signalling at a.c. power port, low frequency immunity tests]

3 术语和定义

IEC 61000 系列其他出版物界定的术语和定义适用于本文件。

4 概述

电力供应行业意在用正弦电压来提供电力。用户设备设计成能在此供电环境下正常运行。然而,因供电系统的内部阻抗不为零,某客户使用的非线性负载接入电网,产生电压波形畸变,可负面影响其他客户以及供电系统本身的设备。没有一种负载或者供电系统设备能完全避免电压波形畸变,尽管他们抗扰度水平(按照惯例设计,并未刻意提高其抗扰度水平)差别很大。基于大量的电压畸变对设备发生故障或损坏的经验,确定了低压公共电网对电压畸变的兼容水平,并在 IEC 61000-2-2 中给出。这些兼容水平与其他数值间的对应关系,详见图 1。图 1 取自 IEC 61000-2-2 的附录 A。兼容水平是在谐波抗扰度和降低发射之间设置的一个可接受的折中值。在 IEC 61000-4-13 中给出了设备的电压畸变抗扰度检验方法。

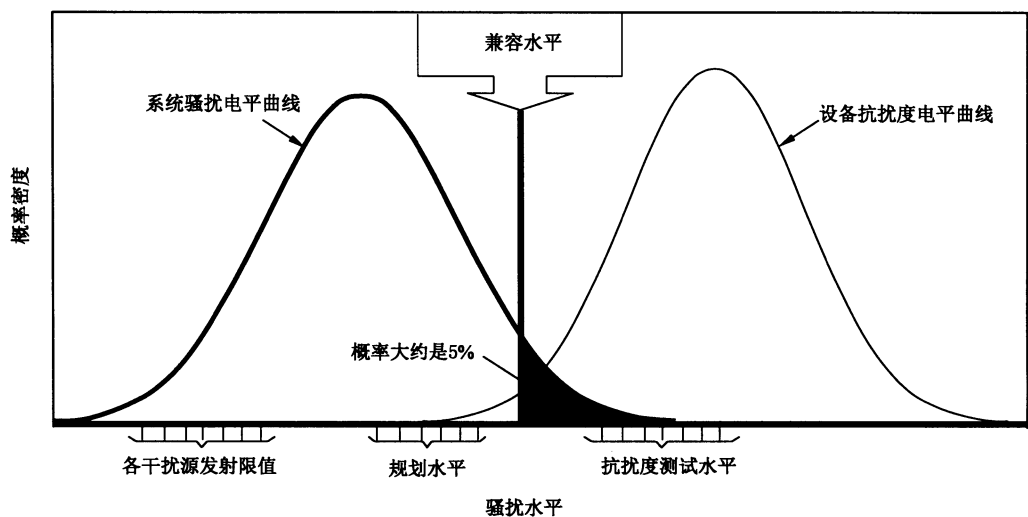
注: IEC 61000-2-2 第一版中的兼容水平适用于本部分。

对连接到低压公共电网的设备应用谐波电流发射限值,是为了在系统层面上使电压畸变水平在绝大部分时间内低于兼容水平,以及在比较大部分时间内低于规划水平,见图 1。

注 1: 进入中压和高压系统的发射水平可由其他方法和流程控制,参照 IEC 61000-3-6。

注 2: 在某些国家,电力供应行业依照 IEC 61000-3-2 来控制便携式设备的发射值,无论公共耦合点是在低压、中压还是高压。

设备的发射值用电流来表示,这是因为电流基本上(并非全部)独立于供电系统的阻抗。而设备产生的电压畸变几乎与供电系统阻抗成比例关系,因此没有一个固定值。设备从供电系统中吸收的非线性电流可视作正弦电流,而注入供电系统中的谐波电流与实际吸收的电流极性相反。



注：图中阴影部分的说明文字，参见 IEC 61000-2-2:2002。

图 1 考虑骚扰和抗扰度兼容水平的示意图

5 标准中与监管法规相关的可接受条款

设备制造业可接受非强制性标准中的要求，是否应用这些要求由客户确定，或由各合同对其调整。当该标准被技术法规引用时，就不允许上述的做法。例如，一个标准的规定如被完全应用，将需要多次测试。签约双方可能会完全或者部分取消这些条款（如采用计算或者仿真），然而，在强制实施时，不允许与要求偏离。

EN 50006 中 7.1 以及 IEC (60)555-2⁵⁾ 中 5.3.1 要求试验人员使用受试设备的控制器来寻找最恶劣的情况进行试验，对 IEC (60)555-2，还需要对各次谐波依次进行上述测试。这样一次测试可能需要很多天，但却不能保证另一个测试人员不能找到另一个最恶劣情况下的谐波，哪怕是单次谐波。该要求在 IEC 61000-3-2:1995 的 C.1 中也存在，直到 IEC 61000-3-2:2000 修改单 1 出来以后才取消。

注：EN 表示欧洲标准。

标准不应包括监管方面的要求，只需关注本标准范围内的产品是否满足标准要求所需的程序。

6 IEC 61000-3-2 及其前身的历史

6.1 1960 年以前

大多数的非线性负载是含半波整流器的电视机。电视机因为大多数含有极性可逆的电源连接器，基本消除了直流分量。而其安装数量不足以因谐波电流发射而产生重大系统问题。但是有证据表明，在某些国家存在连接极性的随机失衡导致的直流分量，造成了对地下电缆的腐蚀问题。

6.2 1960～1975 年

相控的家用灯光调光器开始在市场上销售，这些产品的使用产生了高频传导发射，引起了无线频谱保护部门的注意，并采取包括强制措施在内的措施来对其进行限制，并注意到调光器会产生谐波电流，且没有可行的办法来降低谐波与基波电流的比值。

5) IEC(60)555-2 在 1995 年被取消并被 IEC 61000-3-2 替换。

一项在欧洲范围内开展的系统调查表明,近 90% 的住宅用户(大部分由架空低压分布线路供电)电源阻抗值为 $(0.4 + jh \ 0.25) \Omega$ 。这里 h 表示的是谐波次数, j 为虚数单位。该值包含在 IEC 60725 中。并确定,如果不对调光器的发射进行控制,电压畸变就会超过可接受的水平(之后被称其为兼容水平)。

注:一般兼容水平和发射限值的大小没有直接的关系,关于此方面进一步的信息可参见附录 A。

解决这个问题的第一个标准(该标准自身的测试并没有基于任何一个早期标准)是 EN 50006:1975,作为多个国家标准包括 BS 5406:1976 实施。这个 EN 标准率先考虑一些技术因素,包括电压波动,还包括现在 IEC 61000-3-3 和 IEC 61000-3-11 的主要内容。对谐波电流发射的限制有:

- 禁止超过 200 W 的加热负载使用相控;
- 应用奇数谐波发射限值;
- 针对对称和不对称控制技术应用偶次谐波发射限值。

这些限值表现为谐波电压百分比,由阻抗值为 $(0.4 + jh \ 0.25) \Omega$ 的供电系统产生。然而,实际试验过程需要测量谐波电流,由此计算出电压畸变。标准中没有包含任何关于限值来源的解释,就是 IEC 61000-3-2 中 A 类别设备的限值。毫无疑问,该数值事实上是由供应厂家和生产厂家的专家共同商讨形成的,双方都没有将严格按数学规则确定数据的做法作为优先考虑。

但是,一项研究得出了一个近似算法,用该算法可以确定许多工作于不同触发角的调光灯在为最终配线段馈电的低压变压器端子处,对一个电网电压失真水平累积的影响(参见附录 A)。

6.3 1975~1982 年

在这段时间里,IEC 颁布了一个更为全面的标准 IEC (60)555-2:1982《注入交流电网的谐波》。该标准仍限于 220(380) V~240(415) V、50 Hz 欧洲电网系统,在 1987 年被 CENELEC(欧洲电工委员会)采用并作为 EN (60)555-2。它引入了三种限值,最初的电流限值和 EN 50006 规定的一样,对短时间使用的产品的限值为 1.5 倍,比如手持式工具;以及专门针对电视机的限值,虽然输入功率小于 165 W 的电视机这一豁免条件使得该限值仅应用于小部分电视机。限值直接用电流表示,即使对电视机。

注:所有的 IEC 标准从 1998 年 1 月 1 日起都被纳入到 60 000 系列并重新编号。为了表示在那天之前被废止或以后不再重印,加“6xxx”前缀并放入圆括号内,故有“IEC(60)555-2”。

尽管该标准包含一个附录,声称是解释原始电流限值的来源,但事实上它没有这样做,仅仅是引用了包含在 EN 50006 中电压畸变限值,而没有给出解释。

6.4 1982~1995 年

这期间发生了三个深刻的变化。无论是在商用领域还是在家用领域,开关电源得到了不断推广和使用,欧洲将引入针对电子产品电磁兼容性特性的强制性法规,对欧洲公共电网提出了“产品质量”要求。

早期的 EN 50006 和 IEC (60)555-2 并不适用于专用设备,但是在以上标准里并没有相关定义,只在 EN 50006 引用了“办公机械”作为一个例子。目前尚不清楚这些标准是否适用于办公电脑。在欧洲,自从人们把电脑归为家用电器,这个问题就得到了解决,因此早期的电流限值得到了应用(但是 CISPR 14/EN 55014 还没有被用于办公电脑的高频电磁发射)。然而,随着用开关电源单元供电的单相消费电子产品的大量使用,这些产品几乎同时使用时产生的大电流脉冲使得供电电压波峰出现明显平坦,开关电源单元能够提供技术优势(效益更高,重量更轻,尺寸更小),但大电流脉冲近乎同时发生,会导致电源电压波形显著的畸变(那些带有变压器馈电的非开关电源产品有更低的发射,这是因为变压器的串联阻抗导致整流器有更大的导通角)。

因此,IEC (60)555-2 的后续发展充满了争议。有人提出虽然供电行业继续推进 IEC 61000-3-2 的发展,但是涉及到的相关设备生产行业很少采用此标准。但是应该看到这样的事实,设备生产行业是

一个非常多样化的行业,在考虑谐波电流发射问题时,不同的细分产业有不同的特点。然而供电行业在优先级上只有很少的多样性,主要源于不同国家的基础设施不同。

IEC 61000-3-2:1995 引进了很多新的特征。最显著的是“最大到每相 16 A 输入电流的电子电气设备连接到公用低压配电系统。”(然而,标准中所定义的“专用设备”,对一些要求享有豁免权)。

所以,这些标准包括一些要求和限值,这些要求和限值范围可以适用不同种类产品,它可以分为如下四类,和之前的标准一样,它们仅有效地适用于欧洲地区。

注:尚未知晓 220 V~240 V、50 Hz 的供电系统在其他国家是否和欧洲应用的标准足够相似;同时需要指出,通过“扩展操作”使得这些标准适用于其他电压和频率系统并不可靠。不同的配电系统配置影响着等效电源阻抗和谐波电流在系统中的传播。

A 类属于通用类,适用于一些不能明确包含在其他类别的产品,这类限值源于 1975 年最初的电压限值,以及理论上假设的电源阻抗与谐波频率。这种限值和白炽灯上的调光器的电流发射有关,参见附录 B。

B 类属于特定类,适用于便携式工具,但是它被假设为只适用于很短的一段时间(几分钟)。其限值是 A 类限值的 1.5 倍。至于这个 1.5 倍因子也纯粹是启发性的,虽然对于 3 次谐波,一台恰好满足 3 次谐波限值(3.45A)的设备占据了可分配给低压电网的兼容水平(5%)的几乎所有容许部分(0.25)。

注:参见附录 A 给出了“容许的兼容水平”的解释。

C 类适用于照明设备,需要对其认真定义。它的限值是相当严格的,其中的一些限值或类似的值最初应用于 IEC 60082 中,而现在取消了。参见附录 C。

D 类最初适用于从电源获取脉冲电流的产品,该脉冲位于一个以电流波形峰值为中心的规定包络内。一个典型高效率的在线直流电源单元的整流器导通角为 35° 。由一组这样产品发射的各低阶奇次谐波电流几乎按算术叠加,如果是单相电源,则其电压波形被平坦化。D 类原希望用于直流电源单元,不论是外置或内置;但经过大量的研究(包括用峰值平坦化的正弦波为整流器供电的影响),D 类被设定在约 65° 整流器导通角(带有一些试探性的调整)以包括其他的产品。参见附录 D。

D 类限值和有功功率成正比,因此用毫安每瓦(mA/W)来表示。在 600 W 功率时,D 类限值表面上与(固定电流值)的 A 类限值一致,但由于舍入误差,这两类限值在功率明显不同时每次谐波却相等,最初引起一些混乱。可能得出这样的结论,即应用这些限值时,对电源系统的预期影响不会超过兼容水平。详细的解释可以参见参考文献[12]和[13]。

同时,因为可以接受众多这样的产品对供电网络的影响,人们也认为 D 类限值应该有一个下界,低于下界的将不适用。下界最初设定为 75 W,4 年后规定减少到 50 W。但是,人们并没有意识到这是一个不能如所述的内容那样实施的一个条款,结果那些相信了这个规定的人们对此规定没有得到实施感到失望。

注:没有明确的依据可以算出四年周期,因为 IEC 标准是自愿的,在任何时候可以执行或者不执行。此外,IEC 标准仅只通过同时期开始的投票程进行修改。对多年后可能生效的条款,各个国家委员会不能确定其投什么票。

遗憾的是,为了满足 D 类限值, 65° 导通角使得电源单元的低效率令人相当难以接受,表现为需要热辐射,或需要引入一个电感器,或者一个有功功率因子矫正回路,但这又增加了成本。

因此,这是至今最具有争议的要求。该要求的引入基于以下的统计数据,即欧洲网络电压失真的上升水平以及与看电视习惯相关的 5 次谐波水平的每天变化情况。在过去的十年,在几个欧洲国家确定的上升率大约为 1%,虽然获得的测量数据不都是同时同地。当时由其他干扰源带来的背景水平在一些地点为 3%,5 次谐波的兼容水平为 5%,所以,如果不对上升率进行控制,在大概十年后会导致严重的后果。考虑到相关产品的寿命周期(三到十年),有必要提前几年采取措施,防止谐波超过兼容水平发生。

在当时,有个被称为“平等权利”的原则用于设置限值,该原则可以简单地解释为“任何产品消耗 X 瓦特的电就拥有产生 y% 的谐波电流的权利”。因此,从电视接收器派生出来的分类和限值,被应用到

了所有安装直流供电单元的产品上。然而,这一原则没有考虑到在用的电视机远远多于在任何国家使用都不会超过十台的罕见科学设备的情况。所以,对十台设备花额外的成本应用本限值,对电网及其负载没有多大的意义。

注:“平等权利”也表明容许谐波发射应该与产品消耗电能成比例,从设备设计的观点来看这是完全合乎逻辑的。

对于低功率设备,固定的电流限值非常宽松;而对于高功率设备,固定的电流限值则可能会非常严格。

欧洲对产品 EMC 特性的强制性控制使得 IEC 61000-3-2 成为一个准法律性的文件,这个作用不是仅靠编辑标准就能取得的。

6.5 1995~2000 年

第一版的修改单 1 是在 1997 年发布的,介绍了如下变化:

——“专用设备”定义中增加了“设计由制造商指定”(不幸的是,定义中不能含有要求,所以,其他委员会不能原封不动地采用本定义)。

——吸尘器和空调的测试条件被添加到了附录 C 中。

修改单 2 是在 1998 年 2 月发布的,引入了照明设备有功输入功率不得超过 25 W 的要求。在不设定 75 W 下限条件时,D 类限值适用;或除了需要满足低次谐波电流限值外,电流波形可以满足规定的波形要求。在设定这些限值时,注意了以下事实,即由放电灯产生的五次谐波电流被装有容性滤波器的直流电源单元(如电视机中的)所产生的 5 次谐波电流部分抵消。

修改单 3 源于对 CENELEC 版标准的修改建议,它被转给 IEC SC77A/WG1 并由其负责制定。其他的修改单与该修改单合并后,生成了包括以下内容的合订文本:

——相位角控制的电动设备的限值;

——厨房机器的测试条件;

——不对称控制方法;

——对称控制方法;

——对非专业使用的弧焊设备的测试条件。

这些均不是对标准条款的根本变化。

依照 IEC 出版程序,第 3 个修改单导致在 2000 年 8 月出版了第二个版。

6.6 千禧年修改单

CENELEC 的一个提议导致了对该标准的复评,并在工作组中引起了大量的讨论。其输出的文件提交到 IEC/SC77A 后,在更广的范围内引起了讨论。与此同时,经济上的考虑成为一个专门议题(参见附录 E)。到 1999 年底,由于进一步的讨论不会产生明显的改进,才勉强达成了一个共识,即在完成修改单后,在标准完整版本基础上,立即针对所有记录的原理性条款开始工作。产生的修改单称作“千禧年修改单”,因其大体上在 2000 年初完成。

遗憾的是,1988~1999 年,修改单 3 依然在 IEC 的处理过程中,而 IEC 的程序导致了 CENELEC 中 IEC 标准版本的一个分歧,即尽管实现了千禧年修改单,但不是第三版修改单。在最后的整合版中,产生了一些本来可以避免的困惑。

千禧年修改单(产生了标准 IEC 61000-3-2:2000)消除了许多 1995 年版本中存在的、在监管情况下很难被使用的歧义和不确定性,它放弃了用于确定产品是否是 D 类产品的模板,对某些产品,在技术基础之上不可能确定其是否是 D 类。它用体量大、同时使用的更简短产品列表即个人计算机、个人电脑显示器和电视机来代替,这些产品贡献了(当没有内置的减缓措施时)相位几乎没有差别的奇次谐波电流(而非系统电压的总谐波量)。

该修改单还对照明设备的要求进行了解释。

6.7 IEC 61000-3-2 的未来发展

对该议题的详细考虑,是 IEC 61000-1-X(将出版)的主题。初步的考虑参见附录 F。

7 IEC 61000-3-12 及其前身的历史

7.1 1989~1998 年

IEC 61000-3-2 适用于每相电流不超过 16A 的设备。处理每相电流超过 16A 设备的补充文件,已在 IEC 61000-3-4 中起草,作为一份第二类型的技术报告(预期临时应用的标准),团队由来自西班牙、法国、德国、爱尔兰、意大利、英国、美国的专家组成。该团队的一些研究成果如下所示:

- 一种代数求和法,用于计算直至 5 次的谐波;一种几何法用于计算更高次的谐波。
- 大约为 75% 的兼容水平(例如 5 次谐波)从中压电网中传输,作为一种背景骚扰,传进低压网络。因此,只剩余 25% 的兼容水平,留给容许附加的电压畸变,这些畸变来自于连接在特定低压网络中的非线性负载。参见附录 A。

根据不同的畸变负载划分假设,经粗略计算得到:

- $I_5/I_1 \leq 11\%$ (英国);
- $I_5/I_1 \leq 15\%$ (意大利);
- $I_5/I_1 \leq 16\%$ (瑞士);
- $I_5/I_1 \leq 9\% \sim 16\%$ (德国)。

应依据短路电流比 R_{sc} 确定限值, R_{sc} 越高,限值越高。但原则上,保留在粗略计算得到的范围。

开展进一步的研究以找出 R_{sc} 和限值之间合理的关系。尽管详细的计算已遗失,但“恢复”这些研究基础以便将其与 IEC 61000-3-12 限值关联的尝试参见附录 G。

在附录 G 中的这种处理未深入考虑 IEC 61000-3-4 的条款,因为除了一个文件(关于每相超过 75 A 的设备)以外,所有其他文件在该处理方法出版时已被 IEC 61000-3-12 条款所取代。

这份报告(指上述第二类型的技术报告)1998 年 10 月出版。

注: IEC 不再编制第 2 类型的技术报告。

这些报告要求在出版三年内被复审,IEC 决定将这些报告转化成一份标准,即 IEC 61000-3-12,后者可被 CENELEC 采用,并能被用于证明符合欧洲 EMC 指令。

注: 对于打算出口到欧洲的制造商,以及欧洲内部的制造商来说,这是有帮助的。

7.2 1998 年以后

正如所料,从 IEC 61000-3-4 得到的经验,应用于产生修改 IEC 61000-3-12 的提议。经过大量讨论后,第一次投票文件于 2003 年下发。

8 制定 IEC 61000-3-2 限值时考虑的经济因素(1995 年版本及 2000 年修改单文本完成以前)

在当时,出于经济上可行,IEC 只考虑被动式措施,而且只针对单相设备。对电视机这种产量高、价格高的产品(自镇流灯是典型的低价产品),将增加大约 1 欧元或 1 美元即 1%~2% 的生产成本(不是销售成本)。

通过 75 W 这一更低功率界限来实施成本分摊的想法:

- 在这个功率值以下,没有规定谐波限值,成本只针对电源系统;
- 在这个功率值以上,成本针对产品和电源系统(因为谐波电流不为零)。

IEC 61000-3-2 表 3 中设置这些限值时考虑以上想法。

IEC 61000-3-2 的表 1 和表 2 的限值是把一个更早的欧洲标准(EN 50006)引入到 IEC (60)555-2。没有明确的关于这些表格中的限值在经济学上考虑的信息。在欧洲标准中,标准范围只限于家用电器,因而,那个区域的专家都积极参与此项工作。因此,可以假设,那时有关各方对限值引入带来的经济影响都是接受的。

在准备 2000 年修改单过程中,加强了经济方面的考虑。结果,许多产品被重新从 D 类划分为 A 类(见 6.6)。

附录 A
(资料性附录)
兼容水平和补偿因子

A.1 在低电压网络部分兼容水平在总兼容水平中配额的解释

供电网络中,主要由低压网络中非线性负载的谐波电流,产生低压、中压、高压级别的谐波畸变。在低压网络中产生的谐波畸变,是低压网络中的谐波电压降,以及叠加在中压、高压系统里谐波电压降的几何累加。根据 IEC 标准,低压网络里的谐波畸变不应超过 IEC 61000-2-2 给出的兼容水平。

低压、中压、高压网络中非线性负载的谐波电流,在低压/中压变压器、中压/高压变压器、以及含有发电机的高压网络中,在各自的谐波阻抗中产生谐波电压降。谐波电压降的比例近似与变压器阻抗的比例一致,而变压器阻抗比例是由每个相关变压器短路电压比例决定。

典型的欧洲电网阻抗比例在图 A.1 中给出。总兼容水平划分到每个电压级别的比例,粗略反映了这些阻抗比例的关系。为了解释电压降的几何累加,低压网络 25% 这一数值,来源于阻抗比例。因此在 IEC 61000-3-2 和 IEC 61000-3-12 中,总兼容水平的 25%,用于 230 V、50 Hz 的低压网络中,来自于对非线性负载最大谐波电流的评估。

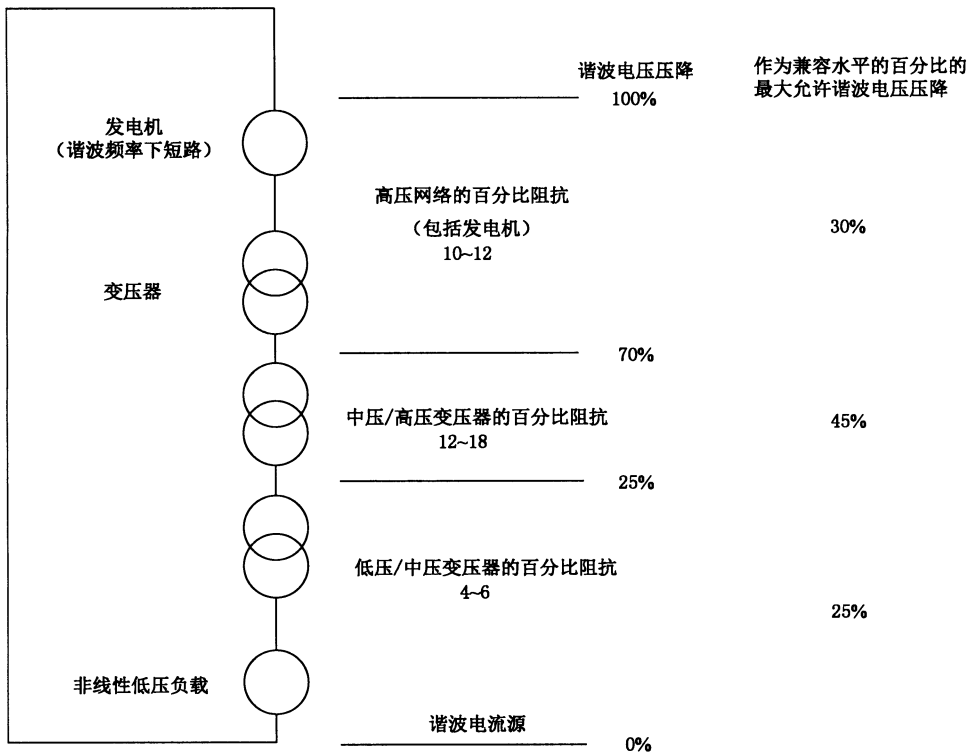


图 A.1 典型系统中变压器阻抗上谐波电压降的分配

A.2 补偿因子

A.2.1 从图 A.1 中模型的推导

从模型中可得,设备中每个谐波频率上最大允许电流发射可表示为:

$$i_{h,eq} = u_{h,CL} k_{N,LV} / Z_{LV,h} k_{p,h}$$

式中:

- h ——谐波次数;
- $i_{h,eq}$ —— h 次谐波时设备中最大允许电流发射;
- $u_{h,CL}$ —— h 次谐波电压畸变的兼容水平;
- $k_{N,LV}$ ——低压网络的共享因子;
- $Z_{LV,h}$ —— h 次谐波的网络阻抗;
- $k_{p,h}$ —— h 次谐波的补偿因子。

A.2.2 详细考虑

$k_{p,h}$ 由许多子因子组成,且没有可广泛应用的分析方法来确定其值。IEC 61000-3-2 第一版的准备过程中所使用的值如表 A.1 所示。如果发射出谐波电流的设备所使用的功率,与短路功率 R_{sc} 相比小,则增大不同谐波电流间补偿的机会。因此, $k_{p,h}$ 依赖于 R_{sc} 因素(R_{sc} 被设备的额定现在功率划分,见 IEC 61000-3-12),如表 A.1 所示。

表 A.1 补偿因子

R_{sc}	$h=3$	$h=5$	$h=7$	$h=11$	$h=13$
33	0.9	0.85	0.75	0.65	0.65
66	0.8	0.75	0.6	0.5	0.5
120	0.68	0.65	0.45	0.35	0.35
175	0.62	0.55	0.35	0.25	0.25
200	0.6	0.5	0.3	0.2	0.2
230	0.55	0.45	0.28	0.180	0.180

注:上述值取自 IEC 61000-3-6 中表 3,并假设使用通用情况从出版的论文中得到。对于同类型设备集中的情形,产生的谐波电流仅在相位上有小的偏差(例如未控制的含容性平滑的整流器),更接近于 1.0 的 $k_{p,h}$ 的值用于低阶谐波。参见 IEC 61000-3-6 中表 4。正在开展的新的调查以证实或改进上述值。

若对实际系统阻抗进行合适的解释, $k_{p,h}$ 成为与估值相关的唯一项。在模型和调查结果间任何偏差的根本原因,一定要把这一项独立出来。来自参考文献[14]中的表 A.2,描述了可视作相对完整的子因子集,尽管可建议为其他情况。此表格也给出了这些子因子以及复合补偿因子的有一定合理性的取值范围。作为最初的近似值,在表 A.2 中,这些子因子相乘以得到复合因子。

宜明确理解,对于某些设备和配置,列出的因子可不独立。如果除了一个因子以外所有非独立因子集中的因子设定取值为 1,各个子因子相乘得到的复合因子的值仍然有效。

表 A.2 $k_{p,h}$ 的子因子

子因子	5 次谐波因子的估计值		
	低的估计	典型值	高的估计
非线性负载补偿因子 ^a	0.1	0.14	1
3 次谐波序列因子 ^b	1	1	1
系统降负荷因子	0.75	1	1.5
负载分散因子	0.5	1	1

表 A.2 (续)

子因子	5 次谐波因子的估计值		
	低的估计	典型值	高的估计
火线-火线和火线-零线 3 相因子 ^c	0.23	1	1
负载相位分散因子	0.4	0.44	1
系统相位分散因子	0.5	0.62	1
电压总谐波畸变因子	0.85	1	1
电流分支因子 ^d	0.76	1	1
谐振因子	1	1.6	4
3 相不平衡因子	1	1.1	1.25
复合因子 $k_{p,5}$	0.01	0.64	7.5
<p>^a 计算复合因子 $k_{p,h}$ 时未考虑线性和非线性负载的混合。</p> <p>^b 三角形连接的变压器中 3 次谐波序列因子仅用于中压网络。</p> <p>^c 该因子可导致对 5 次和 7 次谐波明显的抵消,但在计算中性导体的累加时,如果所有负载连接成 L-N 型结构对于 3 次谐波序列也可增大到 3.0 倍。</p> <p>^d 该因子计算了在电源系统阻抗以及连接的包含电容器组的线性负载的集成阻抗之间的谐波电流的分支。</p>			

从表 A.2 可立即得出几个结论。首先,从合理选择子因子值中得出 $k_{p,h}$ 值中大的涨落变化。这两种结果显然是荒谬的。在极端情况下,用明显站不住脚的值替换 $k_{p,h}$,导致允许的 5 次谐波发射的估计范围从大于 400% 基准电流的一个极端,到小于 0.7% 基准电流的另一极端。两种结果显然是荒谬的。其次,决定忽略特定的子因子(例如子因子设置为 1.0)能显著影响得到的 $k_{p,h}$ 值。组合许多子因子的一些方法,特别是简单的乘法,大大促进了 $k_{p,h}$ 值大的涨落变化的可能性,这能诱使免除只有典型考虑的子集的顾虑,但该结论能证明是不切实际的。

下一步工作是确定正式定义的子因子(可以是或不是那些在表 A.2 中的因子)。这项工作的结果将在 IEC 61000-1-×(将出版)中报道。

附录 B

(资料性附录)

A类限值与含相控调光器的白炽灯在 90°触发角谐波频谱的比较

在不同产品中,含相控调光器的白炽灯在 90°触发角(在该触发角谐波电流发射最大)的谐波频谱变化非常小,A类限值以电流表示。因此,从各限制值中可推断出基波电流的对应值。可知(参见图 B.1)最低的基波电流由直至 15 次的谐波限值决定,此时对应于 745 W 的满负载功率。毫无疑问,由于因适应非线性负载而不是调光器进行的改变,确定最低的谐波限值不太严格。

图 B.1 说明了这种关系,使用对数纵坐标清楚地显示高次谐波限值和频谱值的水平。为了进行比较,20 世纪 70 年代设计(在 EMC 标准符合性是强制性之前)的一个典型调光器测量光谱,负载是一个 230 V,150 W 的灯,触发角 90°。可以看出,对于 13 次以上的高次谐波,限值和频谱值之间的对应关系是十分紧密的。19 次和第 27 次谐波具有稍高的发射水平,这可能是由于供电电压的失真、或者调光器中处于“上升时间”的电感器和降低传导辐射的电容器之间的谐振所引起。

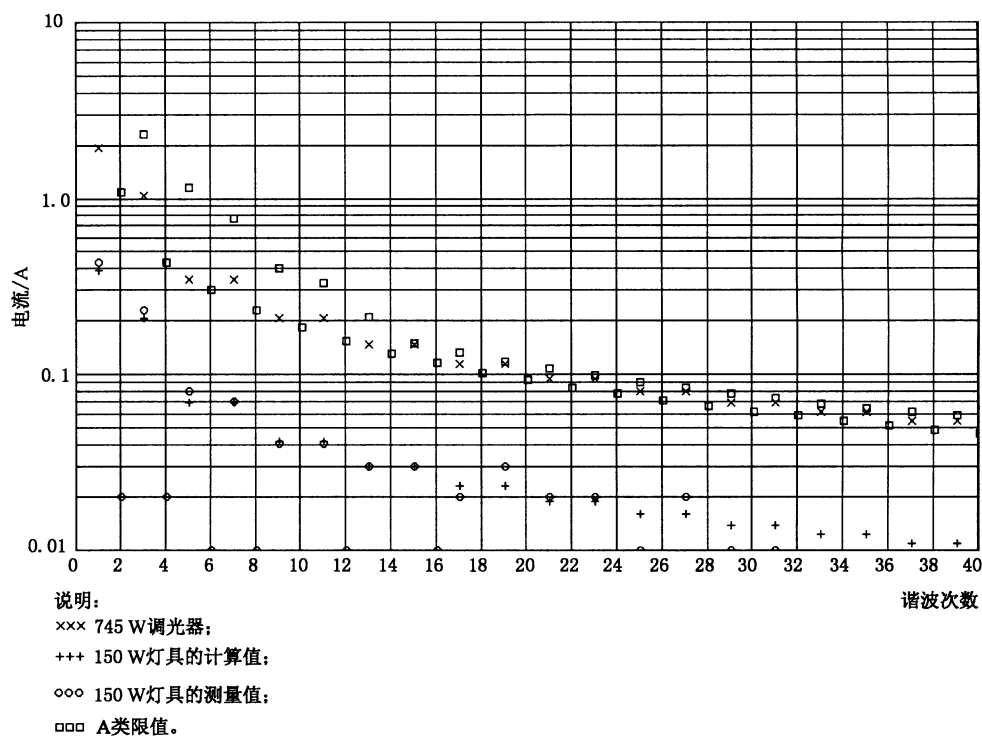


图 B.1 A类限值与调光器谐波频谱的比较

附录 C
(资料性附录)

C 类限值(GB 17625.1 中表 2)与含感性镇流单元放电灯谐波频谱的比较

图 C.1 是自明其义的。

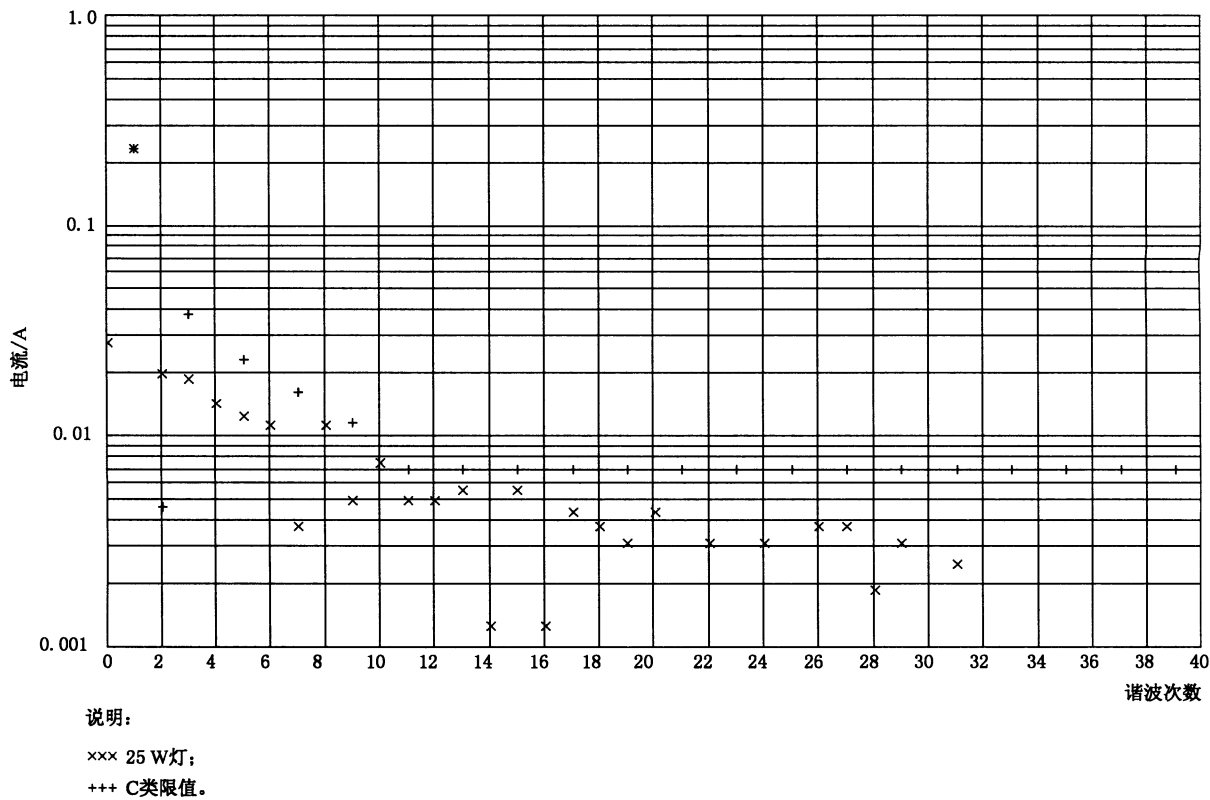


图 C.1 C 类限值与放电灯谐波频谱的比较

附录 D
(资料性附录)

D 类限值与导通角为 35°和 65°的单相电容滤波镇流器谐波频谱的比较

图 D.1 大部分是自明其义的。注意 3 次、5 次谐波发射水平在 65°导通角时与限值一致。

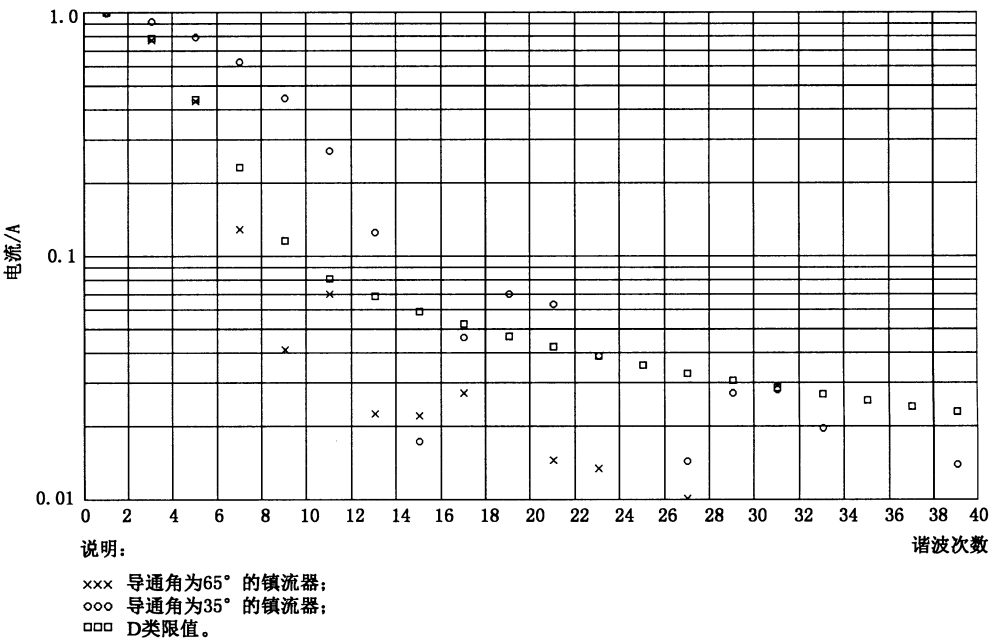


图 D.1 D 类限值与单相 230 W 电容滤波镇流器谐波频谱的比较

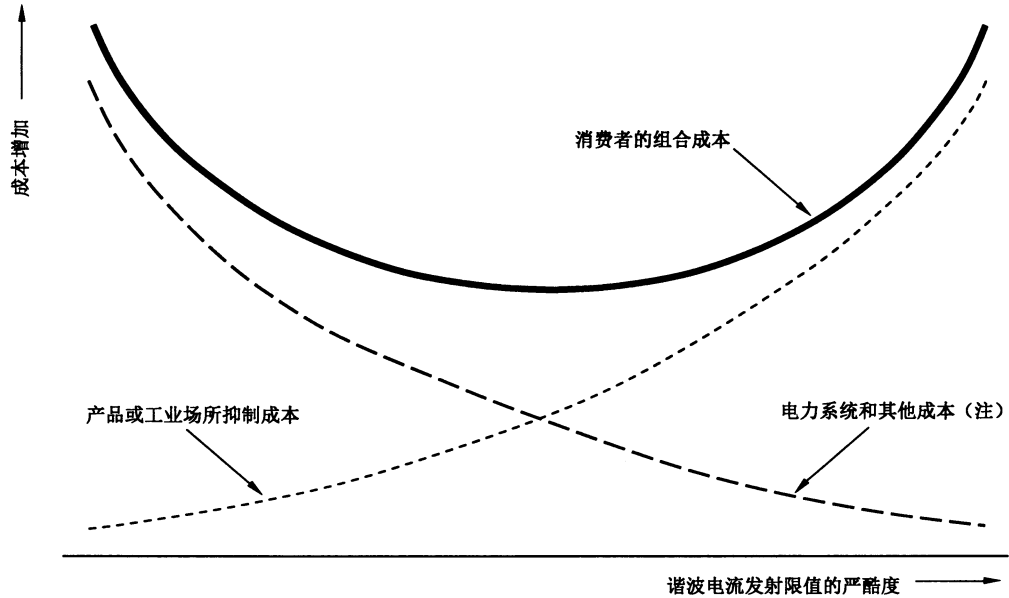
附录 E
(资料性附录)

IEC 61000-3-2 千禧年修正案完成以前制定限值时考虑的经济因素

被动式抑制谐波技术会产生谐波发射的不完全抑制,但与主动抑制技术相比,实现的成本通常较低。目前从成本考虑,对大功率应用来说,无源滤波是唯一可行的方法。近年来功率半导体器件和数字信号处理技术的发展,已使主动抑制技术更具成本效益。总体考虑,在大量产品中(灯具这类低成本产品除外)采用高性能、最新技术的主动抑制技术,平均成本估计在最终用户的产品购价中增加 1%到 2% 的费用。不期望这些百分比会在短期内发生重大变化。实际成本按产品类型变化很大。例如增加的成本在个人电脑的采购价中占比小,而在三相调速器的购买价中却占比达到 60%或以上。

来自产品制造行业的专家估计,每年对所有电气电子产品实现高性能主动谐波抑制技术的总成本是一个很大的数。其结果是谐波电压水平显著降低。从电力供应行业专家的角度估计,如果对设备和工业场所没有谐波发射限值的要求,未来每年投入的治理费用对控制谐波发射影响的贡献是差不多的。在拥有大量资金的情况下,为合理地减少总成本,值得仔细考虑如何尽力优化选择抑制方案。图 E.1 描述了一个维度来自尝试解决问题导致的额外成本之间,进行优化均衡的基本概念。普遍认为,完全依赖产品谐波抑制技术,或者让供电系统能承受来自设备产生的任何水平的谐波发射,例如降低系统阻抗到可以忽略的水平,都是不合适的。同时也普遍认为,尝试把这样的现象,例如电压畸变,降低到某个不必要的低水平,是不合适的。在一些国家,由于公平分摊费用的问题,只有在系统级谐波抑制技术,能比在设备和工业场所采用其他谐波抑制技术时,带来更大的谐波发射减少,成本增加才会被接受。

注: 在一些国家,电力供应行业依据 IEC 61000-3-2 控制设备端的谐波发射。这就意味着消除了工业场所或系统层级上安装谐波抑制技术器件备的需求,因而要在谐波畸变的源头进行分配抑制费用。



注: 大多数“电力系统和其他成本”是电力系统成本。

图 E.1 符合兼容水平的总成本折中概念示意图

附录 F (资料性附录)

IEC 61000-3-2 修订的概要计划

注：这个概要计划也将适用于 IEC 61000-3-12 第二版。

F.1 介绍

注：IEC 61000-3-2 修订的原理性阐述在 IEC 61000-1-×(将发布)中给出。

一致同意基于限值分配开展研究,该限值是建立在供电网络电压畸变中一个产品复合“影响因子”的基础上。影响因子的大部分分量已确定并列举如下。这不是新概念,在参考文献[13]中已提到“饱和因子”和“同步因子”。

F.2 密度

引入密度影响因子目的在于考虑设备的影响,这种影响与现场设备的数量有关。每种设备都会被评估一个密度影响因子。它被定义为设备数量与家用电器数量的比。

注：考虑到密度因子允许在稀有设备中去除严格限值的约束。

F.3 使用因子

使用影响因子目的是考虑与设备使用相关的对网络影响的不一致。基本上,它可由每年的电能消耗与正常使用时最大有功功率的比算出。

额外的校正因子考虑了使用的同时性,比如一年里的每天或者每季度。

注：考虑到使用因子允许在很少使用的设备中去除严格限值的约束。

F.4 贡献

谐波贡献因子尝试描述来自一种特殊或一般设备的整个谐波发射频谱的潜在影响。有足够的精度来定义特定类型或通用类别设备的潜在影响的非线性电流对基波电流的比,用于定义谐波贡献因子。

为了评估通过测量得到的谐波贡献的影响,任何高度准确、可重复的方法是合适的。然而,推荐使用在 IEC 61000-3-2 第二版中定义的方法,以获得平均发射值。

F.5 相位角因子

谐波电流的相位角已被选为相关的影响因子,因为它影响电网电压畸变。例如,考虑到连接到同一个电网的两台设备,根据各自谐波电流的相对相位角,对电网电压畸变有增强或者抵消的影响。

相位角因子小于 1 的设备,由于对电网畸变的影响较小,宜有更加宽松的限值。

F.6 系统和工业场所的谐波抑制

为了获得低压供电网络中非线性负载最佳经济配置,应评估所有可能的技术措施。系统级别上,谐

波电流影响的抑制方法在技术复杂,成本较高。但是使用有些措施(例如降低系统阻抗)是合适的。在与公共电力接口是中压或高压的工业场所级别上的谐波电流影响的抑制方法,可能比设备级别抑制方法更有经济优势。但是引入该项技术依赖于同意采用的发射限值得到认可实行,以及电力供应商与政府间的合作。一些国家已经引入此技术。工业场所级别的抑制技术及其可能不适用于小规模工业场所和住宅场所。

F.7 网络因子

影响因子评估中的网络因子,是考虑了电网的电力特性、电网运行,以及电网中负载间的相互作用。网络因子是电网设计、电网运行、电网负载的相互作用、电网运营商限制的函数。

注:考虑到这些因子允许从某些设备中去除严格限值的约束。

附录 G

(资料性附录)

推导 IEC 61000-3-12 限值

G.1 关联电压降和短路比的公式

在本附录中,额定单相电压 U_p 记作 V ,额定相间电压 U_i 记作 U 。电网线路阻抗 Z 记作 Z_L ,电网中性线阻抗记作 Z_N 。

短路功率:

$$S_{sc} = \frac{U^2}{Z} (U = \text{相间电压}; Z = \text{网络阻抗})$$

短路比:

$$\text{单相: } R_{sce} = \frac{S_{sc}}{3S_{equ}} \text{ 满足: } S_{equ} = V \cdot I_{equ}$$

$$\text{三相: } R_{sce} = \frac{S_{sc}}{S_{equ}} \text{ 满足: } S_{equ} = \sqrt{3}U \cdot I_{equ}$$

每相电压降:

单相:

$$\Delta V \leq |\bar{Z}_L + \bar{Z}_N| \cdot I_{equ} = \left| \frac{\bar{Z}_L + \bar{Z}_N}{\bar{Z}_L} \right| \cdot Z_L \cdot I_{equ} = \left| \frac{\bar{Z}_L + \bar{Z}_N}{\bar{Z}_L} \right| \cdot \frac{U^2}{S_{sc}} \cdot I_{equ}$$

$$\Delta V \leq \left| \frac{\bar{Z}_L + \bar{Z}_N}{\bar{Z}_L} \right| \cdot \frac{U^2}{3 \cdot S_{equ} \cdot R_{sce} \cdot I_{equ}} = \left| \frac{\bar{Z}_L + \bar{Z}_N}{\bar{Z}_L} \right| \cdot \frac{V}{R_{sce}}$$

$$\Delta V \leq \left| \frac{\bar{Z}_L + \bar{Z}_N}{\bar{Z}_L} \right| \cdot \frac{1}{R_{sce}}$$

三相:

$$\Delta V \leq Z_L \cdot I_{equ} = \frac{U^2}{S_{sc}} \cdot I_{equ}$$

$$\Delta V \leq \frac{U^2}{S_{equ} \cdot S_{sce}} \cdot I_{equ} = \frac{U^2}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I_{equ} \cdot R_{sce}} \cdot I_{equ}$$

$$\frac{\Delta V}{V} \leq \frac{1}{R_{sce}}$$

假定基频时最大电压降为 3%。

对于单相设备,如果 $R_{sce} \geq 55$ (假设 $\frac{|\bar{Z}_L + \bar{Z}_N|}{\bar{Z}_L} = 5/3$), $\Delta V/V \leq 3\%$ 。

对于三相设备,如果 $R_{sce} \geq 3$, $\Delta V/V \leq 3\%$ 。

由于输入电流大于 16 A 的大多数设备是三相设备,取最小 R_{sce} 值等于 33。

G.2 连接在公共连接点的谐波电流、谐波电压和短路比的近似公式

假设 Z_L 或 Z_N 是纯感性: $Z_5 = 5 \cdot Z_1$

对于单相:

5 次谐波电压(每相)为:

使用百分比:

$$V_5 = 5 \cdot |\bar{Z}_L + \bar{Z}_N| \cdot I_5$$

$$V_5 = 5 \cdot \left| \frac{\bar{Z}_L + \bar{Z}_N}{\bar{Z}_L} \right| \cdot Z_L \cdot I_5 = 5 \cdot \left| \frac{\bar{Z}_L + \bar{Z}_N}{\bar{Z}_L} \right| \cdot \frac{U^2}{3 \cdot S_{\text{equ}} \cdot R_{\text{sce}}} \cdot I_5 = 5 \cdot \left| \frac{\bar{Z}_L + \bar{Z}_N}{\bar{Z}_L} \right| \cdot \frac{3 \cdot V^2}{3 \cdot V \cdot I_{\text{equ}} \cdot R_{\text{sce}}} \cdot I_5$$

$$\frac{V_5}{V} = \left| \frac{\bar{Z}_L + \bar{Z}_N}{\bar{Z}_L} \right| \cdot \frac{5}{R_{\text{sce}}} \cdot \frac{I_5}{I_{\text{equ}}}$$

$$v_5(\%) = \frac{V_5}{V} i_5(\%) = \frac{I_5}{I}$$

$$\text{并假设 } I_{\text{equ}} = I_5, \text{ 可得: } v_5(\%) = \left| \frac{\bar{Z}_L + \bar{Z}_N}{\bar{Z}_L} \right| \cdot \frac{5}{R_{\text{sce}}} \cdot i_5(\%)$$

对于三相:

5 次谐波电压(每相)为:

$$V_5 = 5 \cdot Z_L \cdot I_5$$

$$V_5 = 5 \cdot \frac{U^2}{S_{\text{equ}} \cdot R_{\text{sce}}} \cdot I_5 = 5 \cdot \frac{U^2}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I_{\text{equ}} \cdot R_{\text{sce}}} \cdot I_5 = 5 \cdot \frac{V}{R_{\text{sce}}} \cdot \frac{I_5}{I_{\text{equ}}}$$

$$\text{用与单相相同的假设, 可得: } v_5(\%) = \frac{5}{R_{\text{sce}}} i_5(\%)$$

对于任意的谐波次数 h :

$$\text{单相: } v_h(\%) = \left| \frac{\bar{Z}_L + \bar{Z}_N}{\bar{Z}_L} \right| \cdot \frac{h}{R_{\text{sce}}} \cdot i_h(\%)$$

$$\text{三相: } v_h(\%) = \frac{h}{R_{\text{sce}}} \cdot i_h(\%)$$

G.3 总加权谐波畸变和部分加权谐波畸变

这些概念用在 IEC 61000-3-12。其目的的解释性说明, 参见附录 H。

G.4 $R_{\text{sce}} = 33$ 时的发射限值

使用下述假设已建立限值:

- 采用比例表示的限值;
- 当连接单个设备时, 不超出兼容水平的 1/4;
- 相应地, 5 次谐波电压 v_5 的最大值为 1.5% (兼容水平 = 6%);
- 对于三相设备, 使用上述公式, 令 $R_{\text{sce}} = 33$, 有 i_5 等于 9.9% 的限值;
- 为避免与现行标准的脱节, 对 5 次谐波的限值已经与 IEC 61000-3-2 中在 16A 时 B 类限值一致, 达到 10.7%;
- 对于单相设备, 限值已经与三相设备的限值一致;
- $R_{\text{sce}} = 33$ 时, 所有谐波次数的限值已与 IEC 61000-3-2 中在 16 A 时 B 类限值一致 (见表 G.4 至表 G.6)。

G.5 R_{sc} 大于 33 时的发射限值

G.5.1 低压系统的假设

- 一个变压器,有 n 个向外流出的具有同等长度的相同馈线,汇入母线。
- 在整个长度上,各馈线有相同的横截面;馈线电阻与离母线的距离,成线性增长关系。
- 在每个馈线最远端的是最大三相电阻。它对应于最小短路比 $R_{sc,min}=33$ 。高功率负载可不与此“远端”点相连。该“远端”阻抗可视为是三相参考阻抗: $Z_{ref,3p}=|0.24+j0.15|\Omega=0.283\Omega$ 。
- 对应 h 次谐波的“远端”阻抗是 $Z_{max,h}=|0.24+jh0.15|\Omega$,例如,对 $h=5$,阻抗为 0.79Ω 。
- 母线上的谐波阻抗 $Z_{B,h}$,对应于 h 倍变压器短路阻抗。例如, $h=5$,变压器数值: $U_{n,Tr}=400\text{ V}$; $S_{n,Tr}=400\text{ kVA}$; $Z_{Tr}\% = 4\%$, $Z_{B,h} = \frac{Z_{Tr,h} U_n^2}{S_{n,Tr}} = 5 \times 0.04 \times \frac{(400\text{ V})^2}{400\text{ kVA}} = 0.08\Omega$
- x_{min} 是母线阻抗 $Z_{B,h}$ 与“远端”阻抗的分数, $x_{min} = Z_{B,h} / Z_{max,h} \approx 0.1$ 。相同的分数 x_{min} 被假定为对基波也是有效的,即母线阻抗对应于 $R_{sc,max} = R_{sc,min} / x_{min} \approx 330$ 。
- 在距离一个虚拟馈线节点 x_{min} ,母线被认为是 $Z_{sc}=0$ 的理想源,见图 H.1b)。虚拟馈线的总长度是“1”。真实馈线的总长度对应于虚拟馈线上的 $(1-x_{min})$ 。该节点在 x_{min} 处对所有虚拟馈线是共同的,并代表母线。
- 在点 x ($x_{min} \leq x \leq 1$) 处,扰动负载被连接到某虚拟馈线中,并在该点注入恒定谐波电流 I_h 在这点。
- 沿每条馈线,客户的装置被连接成均匀分布。

G.5.2 物理描述

从理想源 ($U_{x=0}=0$) 到连接点“ x ” (U_x) 间产生的谐波电压线性增加,到负载连接的虚拟馈线终端“1”处保持不变,在此处接入负载,见图 H.1b)。如果负载连接在远端,达到最高电压 U_{max} 。在点“ x ”点的电压 $U_x = x U_{max}$, 母线电压 $U_B = x_{min} U_{max}$ 。母线电压施加到其余 ($n=1$) 个馈线,沿这些馈线电压保持不变。

G.5.3 总畸变加权值(TDW)

下面的公式,用于计算依赖于连接点“ x ”的干扰负载的总畸变加权值(TDW)。TDW 描述电网中干扰负载对所有设备的总体影响。该 TDW 可以认为是所有“电压·长度”的总和——在电网中的所有馈线组成的区域面积,参见图 H.2。存在三个不同形状的面积[参见图 H.1b)]:

——每条 n 条虚拟馈线有相同面积:

$$A_1 = U_B \cdot (1 - x_{min}) = x_{min} \cdot U_{max} \cdot (1 - x_{min})$$

——在馈线上,随负载从 x_{min} 到 x ,面积线性增加:

$$A_2 = (x - x_{min}) \cdot U_{max} \cdot (x - x_{min}) / 2 = U_{max} \cdot (x - x_{min})^2 / 2$$

——在馈线上,随负载从 x 到“1”区域,恒定电压的面积:

$$A_3 = (x - x_{min}) \cdot U_{max} \cdot (1 - x)$$

作为 x 的函数,TDW 由下式给出

$$\begin{aligned} TDW(x) &= n \cdot A_1 + A_2 + A_3 \\ &= U_{max} \cdot \left[n \cdot x_{min} \cdot (1 - x_{min}) + \frac{(x - x_{min})^2}{2} + (x - x_{min}) \cdot (1 - x) \right] \\ &= U_{max} \cdot \left[n \cdot x_{min} (1 - x_{min}) + (x - x_{min}) \cdot \left(1 - \frac{x + x_{min}}{2} \right) \right] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (G.1)$$

如果负载连接到远端 $x=1$ 处,得到 $TDW_{x=1}$ 的最大:

$$=U_{\max} \cdot \left[n \cdot x_{\min}(1-x_{\min}) + (x-x_{\min}) \cdot \left(1 - \frac{x+x_{\min}}{2}\right) \right] \quad \dots\dots\dots (G.2)$$

在点 x 处, TDW_x 可与最大 $TDW_{x=1}$ 相联系,得到相对值 $tdw(x) = TDW_x / TDW_{x=1}$:

$$tdw(x) = \frac{n \cdot x_{\min} + \frac{x-x_{\min}}{1-x_{\min}} \cdot \left(1 - \frac{x+x_{\min}}{2}\right)}{n \cdot x_{\min} + \frac{1-x_{\min}}{2}} \quad \dots\dots\dots (G.3)$$

如果在不同的点 x 处,负载相同,则参数 x 可用下面的公式,由 R_{sce} 表示:

$$R_{sce} = \frac{33}{x} \quad \dots\dots\dots (G.4)$$

依赖于连接点 x 的相对总畸变加权值“ tdw ”,由 $x_{\min}=0.1, n=3, 4$ 和 5 个馈线,由表 G.1 计算,结果见图 H.2。

表 G.1 依赖于接入干扰负载的连接点 x 的相对总畸变加权值

x	R_{sce}	tdw		
		$n=3$	$n=4$	$n=5$
0.1	330	0.400	0.471	0.526
0.2	165	0.526	0.582	0.626
0.3	110	0.637	0.680	0.713
0.5	66	0.815	0.837	0.854
0.7	47	0.933	0.941	0.947
1.0	33	1.000	1.000	1.000
$x=0.1$; 连接到母线; $x=1$, 连接到馈线远端。 R_{sce} 对点 x 有效的。 n : 从母线中向外流出的馈线数目。				

G.5.4 相对总畸变加权值的近似值

图 H.2 中的曲线,可由下列函数近似得到:

$$tdw(x) = \frac{1}{\left(\frac{R_{sce}}{33}\right)^{\alpha}} \quad \dots\dots\dots (G.5)$$

其中,指数 α 依赖于馈线数 n :

$\alpha=0.40$ 当 $n=3$;

$\alpha=0.33$ 当 $n=4$;

$\alpha=0.28$ 当 $n=5$ 。

G.5.5 相对总畸变加权值和限值之间的关系

在全低压电网系统中,由负载产生的畸变,与负载的谐波电流 I_h ,以及依赖于连接点 x 的相对总畸变加权值 tdw_x 成比例。在不同连接点 x_1 和 x_2 处的两种负载,不能超过同样的“总畸变”。

$$I_{h,x1} \cdot tdw_1 = I_{h,x2} \cdot tdw_2$$

上式也可写为

$$\frac{I_{h,x2}}{I_{h,x1}} = \frac{\text{tdw}_1}{\text{tdw}_2} \dots\dots\dots (\text{G.6})$$

若 $I_{h,x1}$ 表示连接到“最远端”($x_1=1$ 或 $R_{\text{sce}}=33$) 负载的谐波电流限值,则连接到($x_2=x<1$) (或 $R_{\text{sce}}/x=33$) 点的负载的谐波电流限值,可由下面得出:

$$I_{h,\text{lim},x} = \left(\frac{\text{tdw}_{x=1}}{\text{tdw}_x} \right) \cdot I_{h,\text{lim},x=1} = \left(\frac{1}{\text{tdw}_x} \right) \cdot I_{h,\text{lim},x=1} \dots\dots\dots (\text{G.7})$$

使用近似公式(G.5),式(G.7)可以改写为:

$$I_{h,\text{lim},x} = \left(\frac{R_{\text{sce}}}{33} \right)^{\alpha} \cdot I_{h,\text{lim},x=1} = \left(\frac{R_{\text{sce}}}{33} \right)^{\alpha} \cdot I_{h,\text{lim},R_{\text{sce}}=33} \dots\dots\dots (\text{G.8})$$

式(G.8)与谐波限值相联系,依赖于 R_{sce} ,在 $R_{\text{sce}}=33$ 达到极限值。

G.5.6 IEC 61000-3-12 中的限值表 2 依赖于 R_{sce} 值

与单相设备有关的 IEC 61000-3-12 中的限值,用来与式(G.8)比较。作为例子,表 G.2 中包含 5 次和 7 次谐波的限值,以及 $\alpha=0.3$ 时式(G.8)的结果。

值 $\alpha=0.3$,是有 4 个或 5 个反应实际情况的主要馈线的低压系统中的平均值。原始限值和近似限值匹配很好,见表 G.2。

表 G.2 IEC 61000-3-12 中的限值(列 2 和列 4)与由式(G.8)得到的近似值(列 3 和列 5)的比较

R_{sce}	I_5 表 2	I_5 式(8) $\alpha=0.3$	I_7 表 3	I_7 式(8) $\alpha=0.3$
33	10.7	10.7	7.2	7.2
66	13	13.2	8	8.9
120	15	15.8	10	10.6
250	20	19.6	13	13.2
350	24	21.7	15	14.6

对应于更高次谐波的更高的指数 α ,表示考虑了不同负载间相位角的多样性;基于,对应于高 R_{sce} 值的限值更高。尤其是平衡三相设备成立,因为此时相位角通常和单相设备不同。

G.5.7 总结

研究表明,假设条件“低压系统中相等的总畸变加权值”,产生限值和 R_{sce} 之间的关系,这可在现有的 IEC 61000-3-4 和 IEC 61000-3-12 中找到。

已由下列其他假设所确定限值:

- a) 采用成比例的限值;
- b) 容许对三相设备比单相设备设置更高的限值(见表 G.4 和表 G.5),因为和单相设备网络阻抗(Z_L+Z_N)相比,三相设备网络阻抗(Z_L)更低;
- c) 对于特殊类型的三相设备(见表 G.5 和表 G.6),考虑到因这些设备类型而产生的补偿影响,允许其有更高的限值;
- d) 为简化,采用取整数的 R_{sce} 线性函数。

G.6 电压畸变

G.6.1 由公共耦合点上一个设备产生的电压畸变

在表 G.4~表 G.6 中,对不同的 R_{sce} 值,采用 G.2 给出的公式,计算出所有谐波电压。

对单相设备,假设: $\frac{|\bar{Z}_L + \bar{Z}_N|}{\bar{Z}_L} = 5/3$

G.6.2 由低压母线上 n 个设备产生的电压畸变(变压器水平)

考虑两个案例:

——谐波电流线性求和;

——谐波电流平方求和。

假设:

——中压/低压变压器由 n 个相同的非线性负载满负载;

——所有非线性负载符合与 R_{sc} 值相关的发射限值;

——中压/低压变压器的短路电压 u_{sc} 等于 5%。

此处只考虑中压/低压变压器一个相线上的谐波电压降。不考虑由谐波电流流过低压馈线阻抗时,产生的谐波电压降。

记号:

I_1 : 一个设备的基波电流;

I_h : 一个设备产生的谐波电流;

n : 设备数量;

S_{equ} : 一个设备功率;

V_{TH} : 中压/低压变压器一个相线上的谐波电压降;

S_T : 变压器功率;

I_T : 标称变压器相电流;

Z_L : 变压器一个相线上的基波阻抗;

Z_h : 变压器一个相线上的谐波阻抗。

——线性求和

所有谐波电流同相,且线性求和。

可得: $V_{Th} = Z_h \cdot (n \cdot I_h) = (h \cdot Z_L) \cdot (n \cdot I_h)$

和: $u_{sc} = \frac{Z_L \cdot I_T}{V}$ 其中: $I_T = n \cdot I_1$

所以:

$$u_{sc} = \frac{Z_L \cdot n \cdot I_1}{V} \Rightarrow Z_L = u_{sc} \cdot \frac{V}{n \cdot I_1}$$

$$V_{Th} = h \cdot \left(u_{sc} \cdot \frac{V}{n \cdot I_1} \right) \cdot (n \cdot I_h) = h \cdot u_{sc} \cdot V \cdot \frac{I_h}{I_1} \Rightarrow \frac{V_{Th}}{V} = h \cdot u_{sc} \cdot \frac{I_h}{I_1}$$

使用百分比: $v_h(\%) = h \cdot u_{sc} \cdot i_h(\%)$

当 $u_{sc} = 5\%$, 线性求和的通用公式为:

$$v_h(\%) = 0.05 \cdot h \cdot i_h(\%)$$

参见表 G.7 到 G.9。

——平方求和

对于 n 个设备, n 次总谐波电流为: $\sqrt{n} \cdot I_h$

这样:

$$V_{Th} = Z_h \cdot (\sqrt{n} \cdot I_h)$$

$$V_{Th} = h \cdot \left(u_{sc} \cdot \frac{V}{n \cdot I_1} \right) \cdot (\sqrt{n} \cdot I_h)$$

$$v_h(\%) = \frac{h}{\sqrt{n}} \cdot u_{sc} \cdot i_h(\%)$$

中压/低压变压器由非线性负载满负载,所以:

$$n = \frac{S_T}{S_{equ}}$$
$$n = \frac{S_T}{S_{sc}} \cdot \frac{S_{sc}}{S_{equ}} \approx u_{sc} \cdot R_{sce}$$

(如果在公共耦合点和变压器端,短路功率几乎一致的。)

这样:

$$v_h(\%) = \frac{h}{\sqrt{(u_{sc} \cdot R_{sce})}} \cdot u_{sc} \cdot i_h(\%) = \frac{h \cdot i_h(\%)}{\sqrt{\frac{R_{sce}}{u_{sc}}}}$$

其中 $u_{sc}=5\%$,二次平方求和的通用公式为:

$$v_h(\%) = \frac{h}{\sqrt{(20 \cdot R_{sce})}} \cdot i_h(\%)$$

参见表 G.10~表 G.12。

G.7 在公共耦合点上一个设备产生的电压畸变

表 G.3 兼容水平

<i>n</i>	3	5	7	9	11	13
兼容水平(%)	5	6	5	1.5	3.5	3
1/4 兼容水平(%)	1.25	1.5	1.25	0.375	0.875	0.75

表 G.4 一台单相设备的最大谐波电流和谐波电压(引自 IEC 61000-3-12 表 2)

<i>R_{sce}</i>	<i>i₃</i>	<i>i₅</i>	<i>i₇</i>	<i>i₉</i>	<i>i₁₁</i>	<i>i₁₃</i>
33	21.6	10.7	7.2	3.8	3.1	2
66	24	13	8	5	4	3
120	27	15	10	6	5	4
250	35	20	13	9	8	6
350	41	24	15	12	10	8
<i>R_{sce}</i>	<i>v₃</i>	<i>v₅</i>	<i>v₇</i>	<i>v₉</i>	<i>v₁₁</i>	<i>v₁₃</i>
33	3.27	2.70	2.55	1.73	1.72	1.31
66	1.82	1.64	1.41	1.14	1.11	0.98
120	1.13	1.04	0.97	0.75	0.76	0.72
250	0.70	0.67	0.61	0.54	0.59	0.52
350	0.59	0.57	0.50	0.51	0.52	0.50

表 G.5 一台平衡三相设备的最大谐波电流和谐波电压(引自 IEC 61000-3-12 表 3)

R_{sce}	i_3	i_5	i_7	i_9	i_{11}	i_{13}
33		10.7	7.2		3.1	2
66		14	9		5	3
120		19	12		7	4
250		31	20		12	7
350		40	25		15	10
R_{sce}	v_3	v_5	v_7	v_9	v_{11}	v_{13}
33		1.62	1.53		1.03	0.79
66		1.06	0.95		0.83	0.59
120		0.79	0.70		0.64	0.43
250		0.62	0.56		0.53	0.36
350		0.57	0.50		0.47	0.37

表 G.6 一台平衡三相设备的最大谐波电流和谐波电压(引自 IEC 61000-3-12 表 4)

R_{sce}	i_3	i_5	i_7	i_9	i_{11}	i_{13}
33		10.7	7.2		3.1	2
120		40	25		15	10
R_{sce}	v_3	v_5	v_7	v_9	v_{11}	v_{13}
33		1.62	1.53		1.03	0.79
120		1.67	1.46		1.38	1.08

G.8 由低压设备的 n 部分汇总产生的电压畸变(线性求和)表 G.7 n 台单相设备的最大谐波电流和谐波电压(引自 IEC 61000-3-12 表 2)

R_{sce}	i_3	i_5	i_7	i_9	i_{11}	i_{13}
33	21.6	10.7	7.2	3.8	3.1	2
66	24	13	8	5	4	3
120	27	15	10	6	5	4
250	35	20	13	9	8	6
350	41	24	15	12	10	8
R_{sce}	v_3	v_5	v_7	v_9	v_{11}	v_{13}
33	3.24	2.68	2.52	1.71	1.71	1.30
66	3.60	3.25	2.80	2.25	2.20	1.95
120	4.05	3.75	3.50	2.70	2.75	2.60
250	5.25	5.00	4.55	4.05	4.40	3.90
350	6.15	6.00	5.25	5.40	5.50	5.20

表 G.8 n 台平衡三相设备的最大谐波电流和谐波电压(引自 IEC 61000-3-12 表 3)

R_{sce}	i_3	i_5	i_7	i_9	i_{11}	i_{13}
33		10.7	7.2		3.1	2
66		14	9		5	3
120		19	12		7	4
250		31	20		12	7
350		40	25		15	10
R_{sce}	v_3	v_5	v_7	v_9	v_{11}	v_{13}
33		2.68	2.52		1.71	1.30
66		3.50	3.15		2.75	1.95
120		4.75	4.20		3.85	2.60
250		7.75	7.00		6.60	4.55
350		10.00	8.75		8.25	6.50

表 G.9 n 台平衡三相设备的最大谐波电流和谐波电压(引自 IEC 61000-3-12 表 4)

R_{sce}	i_3	i_5	i_7	i_9	i_{11}	i_{13}
33		10.7	7.2		3.1	2
120		40	25		15	10
R_{sce}	v_3	v_5	v_7	v_9	v_{11}	v_{13}
33		2.68	2.52		1.71	1.30
120		10.00	8.75		8.25	6.50

G.9 由低压设备的 n 部分汇总产生的电压畸变(平方求和)表 G.10 n 台单相设备的最大谐波电流和谐波电压(引自 IEC 61000-3-12 表 2)

R_{sce}	i_3	i_5	i_7	i_9	i_{11}	i_{13}
33	21.6	10.7	7.2	3.8	3.1	2
66	24	13	8	5	4	3
120	27	15	10	6	5	4
250	35	20	13	9	8	6
350	41	24	15	12	10	8
R_{sce}	v_3	v_5	v_7	v_9	v_{11}	v_{13}
33	2.52	2.08	1.96	1.33	1.33	1.01
66	1.98	1.79	1.54	1.24	1.21	1.07
120	1.65	1.53	1.43	1.10	1.12	1.06
250	1.48	1.41	1.29	1.15	1.24	1.10
350	1.47	1.43	1.25	1.29	1.31	1.24

表 G.11 n 台平衡三相设备的最大谐波电流和谐波电压(引自 IEC 61000-3-12 表 3)

R_{sce}	i_3	i_5	i_7	i_9	i_{11}	i_{13}
33		10.7	7.2		3.1	2
66		14	9		5	3
120		19	12		7	4
250		31	20		12	7
350		40	25		15	10
R_{sce}	v_3	v_5	v_7	v_9	v_{11}	v_{13}
33		2.08	1.96		1.33	1.01
66		1.93	1.73		1.51	1.07
120		1.94	1.71		1.57	1.06
250		2.19	1.98		1.87	1.29
350		2.39	2.09		1.97	1.55

表 G.12 n 台平衡三相设备的最大谐波电流和谐波电压(引自 IEC 61000-3-12 表 4)

R_{sce}	i_3	i_5	i_7	i_9	i_{11}	i_{13}
33		10.7	7.2		3.1	2
120		40	25		15	10
R_{sce}	v_3	v_5	v_7	v_9	v_{11}	v_{13}
33		2.08	1.96		1.33	1.01
120		4.08	3.57		3.37	2.65

附录 H

(资料性附录)

使用总谐波畸变和部分加权谐波畸变概念的原因解释

宜考虑谐波对供电系统的两个主要影响：

- a) 谐波电流产生额外的电阻损耗，例如在电线、电缆和变压器与发电机的绕组上。所有的损耗由两部分组成：一部分损耗由基波电流产生，另一部分损耗由谐波电流产生(额外损耗)。

$$P_{\text{loss}} = RI^2 = RI_1^2 + R \sum I_h^2 = RI_1^2 (1 + \text{THD}_i^2)$$

式中 R 表示导体的电阻， I 表示总的 r.m.s 电流， I_1 是基波分量， $\sum I_h^2$ 表示谐波含量， THD_i 表示总谐波电流畸变。

显然，为评估由谐波电流产生的额外损耗，THD 是一个合适的度量。

- b) 谐波电流注入电力系统中，产生的谐波电压，可表示为：

$$U_h = Z_h I_h$$

式中 I_h 表示在 h 次谐波电流， Z_h 为 h 次谐波频率下的系统阻抗。对于低次谐波，阻抗可近似计算为 $Z_h = hZ_1$ 。但对于更高次谐波，阻抗可小于按谐波次数的线性增长。近似地， $Z_h \sim \sqrt{h} Z_1$ 更接近实际情况(见下注)。

对高次谐波来说，各次谐波电压 U_h 和相应的兼容性水平或规划水平间的比较，可由总值和相关水平间的比较来替代。这个总值，可为电压的部分谐波畸变， PHD_u 。对高次($h \geq h_{\min}$)谐波电压：

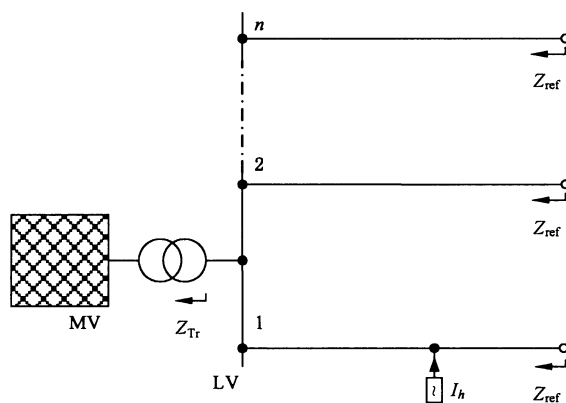
$$\text{PHD}_u = [\sum (U_h/U_1)^2]^{1/2} \sim [\sum (Z_h/Z_1 \cdot I_h/I_1)^2]^{1/2} \sim [\sum h (I_h/I_1)^2]^{1/2} = \text{PWHD}_i, \text{ 当 } h \geq h_{\min}$$

注：谐波次数 h 在第三个求和中没有平方运算。

式中 PWHD_i 表示电流的部分加权谐波畸变。

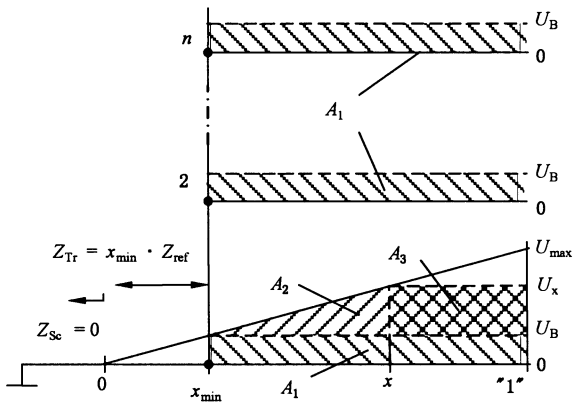
PWHD_i 因子考虑了依赖于系统阻抗特性的实际频率，显著减少了对测量值和限值进行比较的必要努力。

图 H.1 和图 H.2 应用于附录 G 部分的计算过程。



a) 含一个变压器、一根总线、 n 个相同馈线的低压系统示意图

图 H.1 低压系统的示意图和等效电路图



b) 使用“虚拟”馈线的低压系统的等效电路

图 H.1 (续)

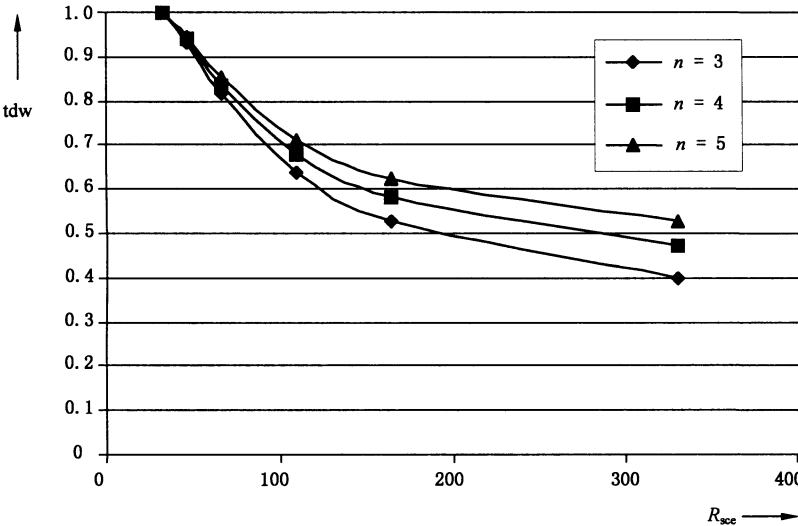


图 H.2 作为短路比 R_{sc} 函数的相对总畸变加权值“tdw”

参 考 文 献

- [1] Kloss A. Statistische Betrachtungen zur Oberschwingungsproblematik in Anlagen der Leistungselektronik. Bull. SEV/VSE 66(1975)8, S. 437-433
- [2] EMC-Guide for Public Power Supply Networks—Compatibility Levels and Permissible Emission. VDEW, 1992 (ISBN 3-8022-0311-9)
- [3] Report on EMC Co-ordination in Electricity Supply Systems—Electricity Product Characteristics and Electromagnetic Compatibility. UNIPED, 230.02 NORMCOMP, Oct., 1994
- [4] E. Wargowski. Harmonic currents in controlled three-phase rectifier installation. CIREN 1981, IEE 197:91-95
- [5] R. Gretsch, G. Krost, Th. Stiller. Network Disturbances Caused by Transient harmonics. CIREN 1985, IEE 250:333-338
- [6] R. Gretsch, W. Günselmann. Harmonic Distortion of the Mains Voltage by Switched-Mode Power Supplies—Assessment of the Future Development and Possible Mitigation Measure. EPE'89, Aachen, Vol. III, S. 1255
- [7] R. Gretsch, G. Krost, Measurement and Calculation of Harmonic Impedance of Loads, LV and MV Networks. CIREN 1983, Liege, c.02. 1-7
- [8] R. Gretsch, M. Neubauer. System Impedances and Background Noise in the Frequency Range 2 kHz to 9 kHz. ETEP Vol. 8, No.5, 1998: 369-374
- [9] R. Gretsch, W. Günselmann. Harmonic in Low-and Medium-Voltage Systems—Analysis of the Disturbing Sources and Measures for a limitation of the Emission. CIREN 1991, Vol.1: reports, Sess.2, Paper 2.01
- [10] X. Dai, R. Gretsch. A Fast and Accurate Method to Measure Interharmonics in Power Systems. ETEP 6 (1996):169-174
- [11] T. Goeke, R. Gretsch et al. Central Compensation of Harmonics—Legal Aspects, System Requirements and Technical Solutions. CIGRE-Conf. Publ. 36-304, Paris, Sept. 1996
- [12] Combinaison des harmoniques dus aux appareils perturbateurs basse tension—Etude théorique. Rapport LABORELEC 3/3/1266/G1/RVD., Sept. 1983
- [13] Harmonic limits for household and similar equipment, Rapport LABORELEC 3/3/1328/G1/RVD., May, 1984
- [14] A. Mansoor, J. McKim. An Examination of the rationale for Limiting Harmonic Emissions from Low-voltage Equipment, Symposium Record of the 1999 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Seattle, WA. Vol.2 934-939
- [15] IEC 60555-2:1982, Disturbances in supply systems caused by household appliances and similar electrical equipment (withdrawn).
- [16] IEC 60082:1984. Ballasts for tubular fluorescent lamps (withdrawn)
- [17] CISPR 14. Electromagnetic compatibility—Requirements for household appliances, electric tools and similar apparatus