

## 前 言

本指导性技术文件等同采用国际标准 IEC 61000-3-6:1996《电磁兼容 第 3 部分:限值 第 6 分部分:中、高压电力系统中畸变负荷发射限值的评估》。本指导性技术文件推荐了中、高压电力系统中畸变负荷发射限值的评估方法。

本指导性技术文件是《电磁兼容 限值》系列国家标准之一,该系列标准目前包括以下标准:

**GB 17625.1—1998** 低压电气及电子设备发出的谐波电流限值(设备每相输入电流 $\leq 16$  A)

**GB 17625.2—1999** 电磁兼容 限值 对额定电流不大于 16 A 设备在低压供电系统中产生的电压波动和闪烁的限制

**GB/Z 17625.3—2000** 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电压波动和闪烁的限制

**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

**GB/Z 17625.5—2000** 电磁兼容 限值 中、高压电力系统中波动负荷发射限值的评估

本指导性技术文件仅供参考,有关对本指导性技术文件的建议和意见,向国务院标准化行政主管部门反映。

本指导性技术文件的附录 A、附录 B、附录 C、附录 D、附录 E、附录 G 和附录 H 为提示的附录。

本指导性技术文件由国家电力公司提出。

本指导性技术文件由全国电磁兼容标准化联合工作组归口。

本指导性技术文件负责起草单位:国家电力公司武汉高压研究所、广州电力工业局。

本指导性技术文件主要起草人:郎维川、徐达明、邬雄、聂定珍、蒋虹、龚增。

## IEC 前言

1) 国际电工委员会(IEC)是由所有参加国的国家电工委员会(IEC 国家委员会)组成的世界性标准化组织,其宗旨是促进电气和电子技术领域有关标准化的全部问题的国际一致。为此,除开展其他活动之外,还出版国际标准,标准委托由技术委员会制定。任何对制定项目感兴趣的 IEC 国家委员会均可参加。与 IEC 有联络的国际组织、政府和非政府机构也可参加这一工作。IEC 与国际标准化组织(ISO)按照两组织间的协商确定的条件密切合作。

2) 由于各技术委员会都有来自对相关制定项目感兴趣的所有国家的代表,所以 IEC 对有关技术内容作出的正式决定或协议都尽可能地表达国际一致的意见。

3) 所产生的文件可采用标准、技术报告或导则的形式出版,以推荐的方式供国际上使用,并在此意义上为各国家委员会所接受。

4) 为了促进国际上的一致,IEC 国家委员应尽可能最大限度地把 IEC 国际标准转化为其国家标准和地区标准,对相应国家标准或地区标准与 IEC 国际标准之间的任何分歧均应在标准中清楚地说明。

5) IEC 不对符合标准与否的争议表态,也不对任何声称符合某一标准的设备承担责任。

IEC 技术委员会的主要任务是制定国际标准。在特殊的情况下,技术委员会可以出版下列类型之一的技术报告。

- 类型 1,当尽管经过再三努力而不能作为国际标准出版时;
- 类型 2,当这个主题仍处于技术发展阶段,或者由于任何其他原因在今后而现在不能马上同意作为国际标准时;
- 类型 3,当技术委员会在例行出版国际标准的过程中,搜集到各种资料,例如“科学发展动态”时。

第 1 类和第 2 类技术报告自出版时起到决定它们是否能够成为国际标准的三年内会受到复审。第 3 类的技术报告直到认为他们提供的资料不再有效或有用之前,没有必要进行复审。

IEC 61000-3-6 是第 3 类技术报告,是由以下委员会制定的:

IEC 技术委员会 77(电磁兼容)的 77A 分技术委员会(低频现象)。

该技术报告是 IEC 61000 的第 3 部分第 6 分部分,按照 IEC 导则 107,它具有基础 EMC 出版物的地位。

本标准文本基于下表中的文件:

委员会草案	表决报告
77A/136/CDV	77A/154/RCV

上表中的表决报告中可找到表决通过本技术报告的全部信息。

附录 A、附录 B、附录 C、附录 D、附录 E、附录 G 和附录 H 仅作参考。

## IEC 引言

本标准是 IEC 61000 系列标准的一部分,该系列标准的构成如下:

第一部分:综述

综合考虑(概述、基本原理)

定义、术语

第二部分:环境

环境的描述

环境的分类

兼容性水平

第三部分:限值

发射限值

抗扰度限值(由于它们不属于产品委员会的责任范围)

第四部分:试验和测量技术

测量技术

试验技术

第五部分:安装和减缓导则

安装导则

减缓方法和装置

第六部分:通用标准

第九部分:其他

每一部分又可分为若干分部分,它们作为国际标准或技术报告出版。

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

GB/Z 17625.4—2000  
idt IEC 61000-3-6:1996

Electromagnetic compatibility—  
Limits—Assessment of emission limits for  
distorting loads in MV and HV power systems

## 1 范围

本指导性技术文件提出了用来作为决定大型畸变负荷(产生谐波和/或谐间波)接入公用电力系统所根据的一些基本原则。其主要目的在于为工程实践提供指南,以保证对所有被接入系统的用户都有合适的供电质量。

由于本指导性技术文件提出的指南必须要以某些假定为根据,所以并不保证这些方法对所有的谐波问题总能提供最优的解决方案。应该灵活地使用所推荐的方法,并应根据工程实际情况决定何时全部或者部分地采用给出的评估程序。

关于产生畸变的设备能否接入电力系统的问题,最终由供电公司决定。

与谐波有关的问题分为两种基本的类型:

——由变压器或其他谐波源把谐波电流注入到供电网络中。谐波电流及其所引起的电压可认为是传导的现象。本标准的目的在于把供电网络中实际的谐波电压限制到对敏感设备不造成有害影响的水平(兼容水平),既然谐波电压是由谐波电流和阻抗引起的,因此必须对注入系统的谐波电流加以限制。

——在 50 Hz~5 kHz 范围内的谐波电流可能把干扰引入到通信系统中。由于在高次谐波频率下电路之间的耦合增加和在音频范围内通信回路有更高的灵敏度,所以这种现象更加显著。

本指导性技术文件的重点主要放在控制或限制谐波电压及其影响,但也有一章涉及对通信的干扰。

注

1 负荷被理解为整个用户的设备。

2 关于系统电压本指导性技术文件使用下列的术语:

——低压(LV)指的是  $U_N \leq 1 \text{ kV}$ ;

——中压(MV)指的是  $1 \text{ kV} < U_N \leq 35 \text{ kV}$ ;

——高压(HV)指的是  $35 \text{ kV} < U_N \leq 230 \text{ kV}$ ;

——超高压(EHV)指的是  $230 \text{ kV} < U_N$ 。

本指导性技术文件中网络的作用比它的标称电压更重要,例如:一个用于配电的高压系统,可能会给出一个“规划水平”(见第 3 章),这是一个位于中压系统和高压系统之间的水平。

## 2 引用标准

下列标准所包含的条文,通过在本指导性技术文件中的引用而构成本指导性技术文件的条文。本指导性技术文件出版时,所示版本均为有效。所有标准都会被修订,使用本指导性技术文件的各方应探

讨使用下列标准最新版本的可能性。

GB/T 4365—1995 电磁兼容术语(idt IEC 60050-161;1990)

GB 17625.1—1998 低压电气及电子设备发出的谐波电流限值(设备每相输入电流 $\leq 16$  A)  
(eqv IEC 61000-3-2;1995)

GB/T 17626.7—1998 电磁兼容 试验和测量技术 供电系统及所连设备谐波、谐间波的测量和  
测量仪器导则(idt IEC 61000-4-7;1991)

IEC 61000-2-2;1990 电磁兼容 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  
和电网传输信号的兼容水平

### 3 基本概念

单台设备或者一个用户的总负荷的发射限值应该在电压质量标准的基础上加以规定。某些基本概念是用于评估电压质量的。为了使这些概念对于评估方面是有用的,要根据它们应用的地点(位置)以及它们是如何测量(测量的周期,采样时间,平均持续时间,统计方法)和计算等方面来加以规定。这里描述了这些概念,并在图1和图2中进行了说明。有关定义可参见GB/T 4365。

#### 兼容水平

兼容水平是用来协调组成供电网络的设备或由供电网络供电的设备发射和抗扰度的参考值(见表1),以保证整个系统(包括网络及所连设备)的电磁兼容性(EMC)。利用表示骚扰的时间和空间的概率分布,兼容水平一般以整个系统的95%概率水平为基础。由于供电公司不可能在所有时间对网络的所有各点进行控制而允许有偏差,因此,应该以整个系统为基础,按兼容水平进行评估,而不对某个特殊位置的评估提供评定方法。

表1给出了LV和MV系统的谐波电压兼容水平(用标称电压的百分数表示)。

表1 LV和MV电力系统中谐波电压兼容水平

非3倍次数奇次谐波		3倍次数奇次谐波		偶次谐波	
谐波次数 <i>h</i>	谐波电压 %	谐波次数 <i>h</i>	谐波电压 %	谐波次数 <i>h</i>	谐波电压 %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	$0.2+1.3 \times (25/h)$				

注:总谐波畸变率(THD):8%。

#### 规划水平

规划水平是在规划时评估所有用户负荷对供电系统的影响所用的水平。供电公司为该系统的所有各电压等级规定了规划水平,并且规划水平可以认为是供电公司内部的质量目标。规划水平等于或小于兼容水平。由于随着网络结构和环境条件的不同而有不同的规划水平,所以只可能给出一些指标值。作

为例子,见表 2 中给出的谐波电压的规划水平。

表 2 中的规划水平不用于控制诸如地磁暴等不可控事件产生的谐波。

本指导性技术文件的其余部分概述了利用这些规划水平评估每个用户的连接要求的程序。

**评定程序**

测量谐波、谐间波的基础标准是 GB/T 17626.7。为了把实际的谐波水平与规划水平进行比较,测量的最小周期建议为一个星期。

——每天最大的 95% 概率的  $U_{h,95}$  值(在“非常短”的 3 s 时段各次谐波分量的有效值)不宜超过规划水平。

——每星期最大的  $U_{h,sh}$  值(在“短的”10 min 时段,各次谐波的有效值)不宜超过规划水平。

——每星期最大的  $U_{h,95}$  值不宜超过 1.5~2 倍的规划水平。

注:谐波测量一般最高到  $h=40$ ,在大多数情况下,对于评估电源骚扰的畸变影响这是足够的。但是,在某些情况下,直到 100 次的更高次的谐波可能有重要的作用。例如:

- 电压波形有缺口的大型换流器;
- 具有多脉波数换流器的大型设施(例如铝厂);
- 与电力系统连接的带有 PWM 换流器的新型电力电子设备。

这些实例可能导致在邻近的敏感设备中(例如传感器、通信系统等)引起噪声干扰。一般认为,较高次的谐波随位置和时间变化比较低次的谐波更明显。较高次的谐波是由单相负荷用户产生的,经常还伴有电力系统谐振。(当与高次谐波有关时,可能需要范围更广的评估)。

这些实例可能导致在邻近的敏感设备中(例如传感器、通信系统等)引起噪声干扰。一般认为,较高次的谐波随位置和时间变化比较低次的谐波更明显。较高次的谐波是由单相负荷用户产生的,经常还伴有电力系统谐振。(当与高次谐波有关时,可能需要范围更广的评估)。

表 2 MV、HV 和 EHV 电力系统<sup>1)</sup>谐波电压规划水平的指标值(用标称电压的百分数表示)

非 3 倍次数奇次谐波			3 倍次数奇次谐波			偶次谐波		
谐波次数 $h$	谐波电压 %		谐波次数 $h$	谐波电压 %		谐波次数 $h$	谐波电压 %	
	MV	HV-EHV		MV	HV-EHV		MV	HV-EHV
5	5	2	3	4	2	2	1.6	1.5
7	4	2	9	1.2	1	4	1	1
11	3	1.5	15	0.3	0.3	6	0.5	0.5
13	2.5	1.5	21	0.2	0.2	8	0.4	0.4
17	1.6	1	>21	0.2	0.2	10	0.4	0.4
19	1.2	1				12	0.2	0.2
23	1.2	0.7				>12	0.2	0.2
25	1.2	0.7						
>25	$0.2+0.5 \times (25/h)$							

1) 对于 HV 系统而言,关于  $U_2$  的规划水平值 1.5% 似乎可能是相当高的,但可能会遇到这样的值,并值得注意,2 次谐波并不总是与直流分量联系在一起的。  
注:总谐波畸变率(THD),MV 网络为 6.5%,HV 网络为 3%。

图 1 和图 2 说明了上述的基本概念,并力图强调这些基本变量之间最重要的关系。在整个电力系统中(见图 1),在某些场合不可避免地会出现干扰,因此,在骚扰水平的分布和抗扰度水平之间有明显的重叠。一般地,规划水平等于或小于兼容水平,它们是由网络的业主规定的。抗扰度试验等级按照有关

标准的规定或者由制造商和用户之间商定。

如图 2 所示,在任一位置处的骚扰水平和抗扰度水平的概率分布通常比整个电力系统的要窄,所以在多数位置处骚扰水平和抗扰度水平的分布有一点重叠或者没有重叠。因此,干扰的影响较小,设备能满意地执行其功能,即比图 1 所建议的更容易达到电磁兼容性。

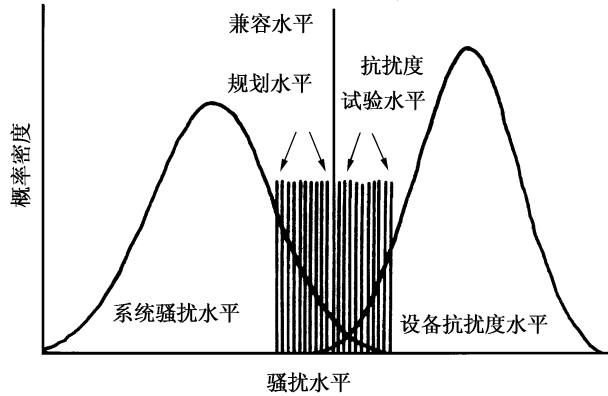


图 1 利用包括整个系统的时间/位置统计分布的电压质量的基本概念图示说明

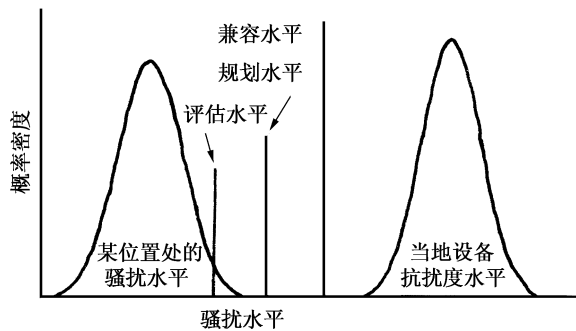


图 2 有关整个系统中的某处时间统计分布对电压质量基本概念的图示说明

### 发射水平

在每一谐波(谐间波)频率,畸变负荷的发射水平是谐波(谐间波)电压(电流)。如果没有其他畸变负荷出现,那末由该负荷引起的谐波(谐间波)电压(电流)进入到电力系统中。

为了把用户的总负荷谐波电流发射与发射限值相比较,测量的最小周期建议为一个星期。

——每天最大的 95% 概率的  $I_{h,95}$  值(在“非常短”的 3 s 时段各次谐波分量的有效值),不宜超过发射限值。

——每个星期最大的  $I_{h,sh}$  值(在“短”的 10 min 时段各次谐波的有效值)不宜超过发射限值。

——每个星期最大的  $I_{h,95}$  值不宜超过 1.5~2 倍的发射限值。

——短持续时间猝发谐波(时间 < 3 s)也应该加以限制,例如,关于电网信号系统,这个问题正在研究中。

实际上,一般是从有关负荷和系统的数据来评估这些水平的;由于可能有许多其他的畸变负荷出现,直接测量这些水平是困难的(有关谐波测量的基本原理见 GB/T 17626.7)。另外有一份关于这个课题的技术文件正在研究中。

## 4 基本原则

所提出的接受畸变负荷的评估方法取决于用户的协议功率、产生谐波设备的功率和系统特性。其目标在于把来自各用户总的负荷注入的电压畸变水平限制到不致超过规划水平。确定了一个三级评估法，这三个等级可以按顺序使用或独立使用(见图 3)。

### 第 1 级:骚扰发射的简化评估

对于用户安装小型电气设备,供电公司一般不必经专门的谐波发射评估,即可以接受。其发射的限制一般由这些小型设备的制造商负责。例如,GB 17625.1 是一个产品类标准,这个标准对连接到 LV 系统的设备规定了谐波发射的限值。由于下列的原因,目前还没有关于 MV 设备的发射标准:

- 中压等级的电压在 1 kV 和 35 kV 之间变动;
- 国际上对中压系统还没有规定基准阻抗。

有些国家的供电公司能够确认本国的 MV 和 HV 系统的基准阻抗,这就使得他们能够规定谐波电流的发射限值,并且对按第一级接入的用户负荷,不必进行详细的估算。

即使不能够规定基准阻抗,但也有可能规定关于 MV 系统(甚至 HV 系统)接受用户负荷的准则。例如,可以按惯例采用一个“加权的畸变功率”(见 7.1.1)作为对用户设备内的总畸变负荷的估计。如果总畸变功率或用户的协议功率相对于在公共耦合点(PCC)处的短路容量是小的,则不必进行详细的估算。

第 7 章建立了关于应用第 1 级评估时的特殊准则。

### 第 2 级:与实际网络特性有关的发射限值

如果某负荷不满足第 1 级准则的要求,则应结合系统吸收谐波的能力来评估产生谐波的设备的特性。系统的吸收能力是根据规划水平导出的,并且按照每个用户对系统总容量的需求分配给各用户。在中压系统,当把规划水平分配给各用户时,也应考虑从高压系统导出的骚扰水平。

这个方法的基本原理是:如果一个系统是满负荷的,并且所有用户最多都注入各自限值的骚扰,那么总的骚扰水平将等于规划水平。第 7 章概述了把规划水平分配给各用户的一种程序。

### 第 3 级:在特殊和根据不充足的情况下,接受高的发射限值

在特殊环境下,用户可能请求把骚扰发射超过第 2 级允许限值的负荷接入系统。在这种情况下,用户和供电公司要商定一些可接入畸变负荷的特殊条件。为了确定这些特殊的条件,必须对现有和将来的系统的特性仔细地进行研究。

注:应用第 7 章、第 8 章、第 9 章推荐的方法所得到的发射限值是力图使谐波水平低于规划水平。应用第 10 章所述的其他方法是为了限制对通信的干扰。

### 责任范围

用户应负责在 PCC 处的发射维持低于由供电公司规定的限值。

注:本指导性技术文件主要是与发射有关的。但是,如果接入了滤波器或电容器组而没有适当的考虑它们在电力系统中正常出现的谐波干扰,那么谐波的吸收也可能是一个问题。因此,谐波吸收的问题也是用户责任的一部分。供电公司应遵照国家的要求,负责在正常运行条件下完全控制骚扰水平。

供电公司必须提供用于评估用的网络数据,评估程序(见图 3)是按照这样一种方式来设计的:即来自用户的谐波发射不致引起整个系统的谐波电压水平超过规划水平和兼容水平。然而,并不保证应用所推荐的方法完全不超过这些水平。

最后,当有必要鉴定减少发射的最佳方法时,供电公司和用户应相互配合。用户有责任选择这种减

少发射的方法及其设计。

## 5 对发射水平评估的一般指南

### 5.1 畸变负荷谐波注入的评估

本章考虑了在电力系统和用户设备中可能存在的各种运行情况和非理想的工作条件,其意图在于为评估畸变负荷的谐波注入提供一般的指导。有关评估工厂供电系统中发射水平的更详细的资料可以参考其他的 IEC 出版物[1]<sup>1)</sup>。

#### 畸变负荷的运行条件

评估畸变负荷的谐波注入时应考虑最不利的运行情况,包括部分时间的计划停电(例如——大型多相整流设备中一台 6 脉波整流器的计划停电)。

对于简单的情况,利用每一谐波频率和谐间波频率下的最大电流可以评估用户畸变负荷注入的谐波,这些最大电流可以超过每一台设备可能运行的范围。对于大的负荷,这种方法可能导致过分保守的结果,而为了评估这种畸变负荷注入的最大谐波,可以考虑所有设备可能同时运行的最不利方式下的一组谐波和谐间波电流。

#### 非理想的运行条件

在实际情况下,供电网络和用户设备不可避免地会出现某种程度的不对称,这将会导致产生非特征谐波。相对于特征谐波来说,这些非特征谐波也许很小,但是在预测某些类型的负荷(如不断变动的负荷、采用多脉波数整流器的大型整流装置)的骚扰水平时,应计及这些非特征谐波。

必须考虑下列的非理想运行条件:

——供电电压不平衡

在三相供电电压中出现的基频的负序分量通常会产​​生正序和/或负序的 3 倍次的奇次谐波。对于电力系统非理想的稳态运行,应考虑电压不平衡率(最高为 2%)。

——换流变压器和换相阻抗不平衡

两个 12 脉波换流变压器之间的匝数比(匝数比不是准确地等于 $\sqrt{3}$ )和电抗的制造允许偏差

一般只产生与 6 脉波变流器相联系的非特征谐波,相间的换相阻抗不对称产生非特征谐波也取决于变压器绕组的连接方式。

——点火角不对称

阀点火瞬时的变化产生各次谐波。各阀之间的点火角的偏差取决于点火回路的实际设计。

——滤波器脱谐

为了符合发射限值的要求,在安装谐波滤波器时,需要评估谐波骚扰,也应考虑脱谐的影响,其主要原因是:

——在稳态运行时,电源频率会发生变化;

——由于制造偏差引起的初始失谐和因环境温度变化而引起滤波器元件值的改变;

——滤波器元件的老化;

——滤波器和电容器组随着负荷变化的计划切换操作。

1) 方括号中的数字指的是附录 H 中参考资料的编号。

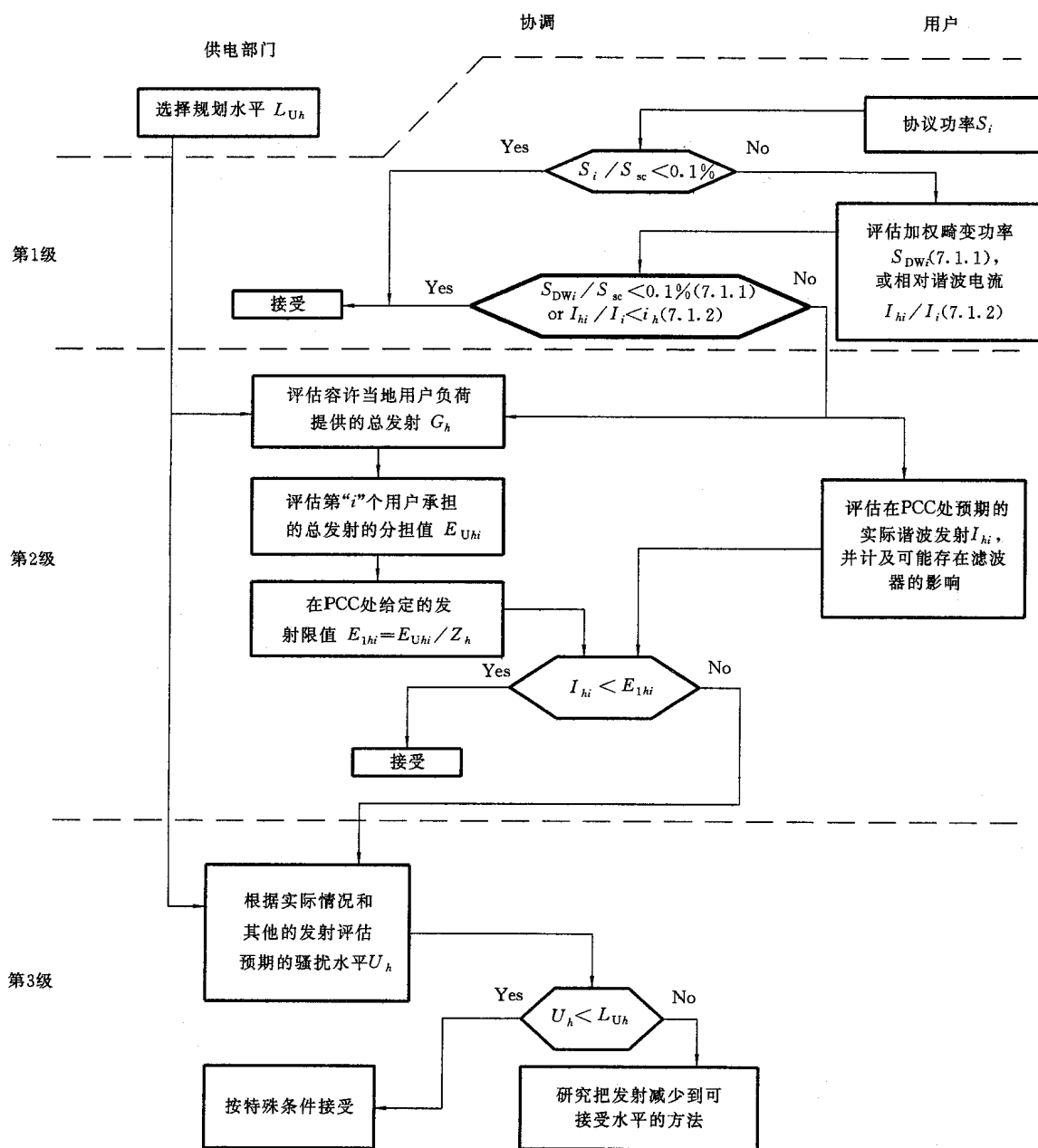


图3 评估程序框图

## 5.2 谐波阻抗

大多数畸变负荷起着谐波源的作用。预测被接入负荷在PCC出现的谐波电压必须掌握从PCC看去的网络的谐波阻抗。为了估算负荷的谐波电流在供电网络的其他元件上产生的电压也需要进行计算谐波阻抗。

然而,谐波阻抗的估算可能是一个十分复杂的问题。现在已有一些测量和计算的方法,但是没有一种是完全令人满意的。甚至连最好的计算机程序或网络分析仪也不能弥补可靠数据的不足,此外,网络的谐波阻抗随着时间可能有显著的变化。

可参考国际会议上的一篇文章“网络谐波阻抗评估指南”[2]。以下给出了进行手工计算的指南,在大多数情况下有足够的准确度,尤其是对于有关中压网络的问题。

### 5.2.1 简化的评估方法

为了讨论几种基本情况,以图4的简化网络作为参考。

与频率成正比的  $Z_k$

在没有大的功率因数补偿电容器和大的电缆网络(图4中略去了 $\Sigma C$ )的简单网络的情况下,不可能出现频率超过13次谐波谐振的条件。在这种情况下,可以认为 $Z_k$ 主要是感性的,近似计算式为:

$$Z_k = h \cdot X_{IPCC} = h \cdot (X_{IHV} + X_{ITr} + X_{IF}) \quad (1)$$

在下列几种情况下使用这种方法,可以有合理的准确度(一般不大于 $\pm 20\%$ ):

- MV 母线是通过变压器供电的,变压器的阻抗  $X_{Tr}$  大于 HV 电源的阻抗  $X_{HV}$ ;
- 当  $X_{Tr}/X_{HV} > 10$ , 在所研究的频率范围内,高压电源可能发生谐振时;
- 当  $X_{Tr}/X_{HV} > 4$ , 在所研究的频率范围内,高压电源不可能发生谐振时;
- 当连接到二次系统的总电容小,以致谐振频率至少为所研究的最高谐波频率的 2.5 倍时。

具有单次并联谐振的  $Z_k$

第一并联谐振点的频率通常估计为:

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (2)$$

式中:  $L$ ——与  $X_{IBB}$  对应的每相电感;

$C$ ——每相的总电容(计及功率因数补偿电容和电缆电容)。

另一个公式也可以估算  $f_r$ :

$$f_r = f_1 \sqrt{\frac{S_{sc}}{Q_c}} \quad (3)$$

式中:  $f_1$ ——基波频率;

$S_{sc}$ ——系统母线处的短路功率;

$Q_c$ ——系统中的电容和电缆发出的总无功功率。

并联谐振频率  $f_r$  的估算是在假设所有的电容元件都连接到母线上时的一种近似计算。根据图4,在PCC处所得的  $Z_k$  值是两个分量[ $(X_{IBB}$  和  $C$  并联)+ $X_F$ ]的和。

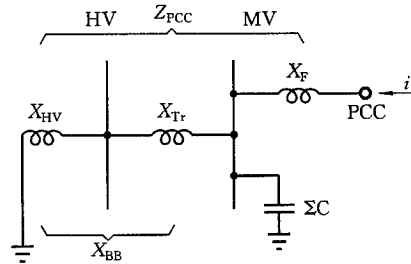


图4 用于评估“阻抗包络线”的网络接线图

但是,在靠近谐振点处,这种方法给出的阻抗值非常高。为了计算出正确的值,应该计及网络阻抗的电阻分量。然而,在实际情况下,确定谐波频率下的电阻分量是十分困难的。因此,建议在计算  $Z_k$  的值时只用  $L$  和  $C$  而忽略阻性分量,并且限制  $Z_k$  的值使得谐振放大倍数( $k = Z_k / (h \cdot X_{IPCC})$ )不超过 3~10 倍。较小的倍数适用于负荷较重的网络,而较大的倍数用于带有很轻负荷的网络。在公用电网中,正常情况下谐振放大倍数不超过 5 倍,但是在某些工业网络中,在照明负荷或高的电动机负荷的情况下,放大倍数可能达到 8~10 倍。

一般情况:“阻抗包络线法”

复杂的供电网络和与其相连的设备一般地会产生多频点谐振。它们起源于无功补偿设备或滤波系

统的电容器以及电缆和线路的电容。此外,网络结构的不固定使得阻抗随不同的网络结构或不同的负荷而变化。整个系统越复杂,则谐振的频点越多。例如在图4中的PCC处的一个附加电容( $G_{PCC}$ 和 $X_F$ 并联)会引起的二次谐振,其谐振频率一般地比第一次谐振频率更高。

在正常的MV系统中,引入一个如上所述的在2~5之间的系数“ $k$ ”能适度地阻尼第一次谐振。第二次谐振和更高次数的谐振的阻尼通常比第一次谐振要低。(在这些情况下,像换相缺口这样的电压突变会导致阻尼振荡)。然而,迄今为止的经验表明:对于第二次和更高次数的谐振, $Z_h/(h \cdot X_{IPCC})$ 的比值小于1。

简化方法利用了阻抗包络线(见图5),该曲线描述了幅值,但没有关于相角的信息。这个包络线包括了第一谐振点(放大系数为“ $k$ ”)的最大阻抗值和更高频率的谐振点(相应于网络短路阻抗的放大系数为“1”,而不考虑谐振回路)的最大阻抗值。

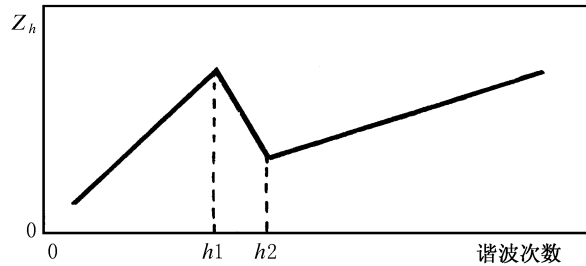


图5 中压网络的“阻抗包络线”

图中 $h_1$ 由 $f_r/f_1$ 给出( $f_r$ 根据式(2)或式(3)),并且 $h_2=1.5 h_1; h_1$ 及以下:

$$Z_h = k \cdot h \cdot X_{1BB} + h \cdot X_{1F}; h_2 \text{ 以上}; Z_h = h \cdot X_{1PCC}。$$

利用这一方法,可以免去具体的分析(测量和模拟)。但是,此法常常会导致对谐波电压的过高评估。(见注1)。

注

- 1 以上给出的谐波阻抗包络线并没有给出用户设备阻抗和系统阻抗之间何处可能发生谐振的足够的信息(例如谐波滤波器设计),在这种情况下,必须要确定谐波阻抗的相角。而且,假如对用户的发射限值是用电流来表示的,那么在滤波器母线侧看到的电力系统的最小阻抗也应该考虑,以便检验接在滤波器之后的网络中的电流。如果在用户设备和网络之间存在有串联谐振,则表示并联滤波可能不充分。
- 2 对于电压高于35 kV的系统,一般不推广此法。但是,在评估网络谐波阻抗时,通常建议要考虑系统的各种运行方式以及可预见到的将来系统的变化。对每一感兴趣的谐波频率,应该把表明最大和最小阻抗的幅值和相角的轨迹以表格或一组曲线的形式当预期现有和将来的系统结构之间有重大的改变时,应该能清楚地提供系统的组成结构,以便使用户能够对他的设备进行最优的设计。

由于广泛研究的结果,有可能确定特定类型的MV网络最大的谐波阻抗包络线。这种包络线有时候是为了快速评估网络谐波阻抗而作为“最不利情况下的阻抗曲线”来使用的。附录A给出了这种方法的应用实例。

### 5.2.2 详细的手算法

更精确的手算法如扩展数据表技术是可行的,但推荐使用计算设备。作为例子,附录B中给出了由VDEW(Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke)推荐的方法。

## 6 求和法则

为了考虑传导骚扰的叠加,有必要采用有关各种负荷产生的骚扰相加的假定。在谐波骚扰的情况下,在配电系统任何点上实际的谐波电压(或谐波电流)是每个谐波源的各分量矢量相加的结果。

一般使用的有两种求和法则,第一种求和法则应用起来比较简单,第二种则是更一般的求和法则。

### 6.1 第一求和法则

第一求和法则即一种利用差异因数  $k_{hj}$  的简单线性法则：

$$U_h = U_{h0} + \sum_j k_{hj} \cdot U_{hj} \quad (4)$$

式中： $U_{h0}$ ——供电网络的背景谐波电压(当第  $j$  个负荷未接入时在供电网络中出现的谐波电压)。

差异因数  $k_{hj}$  的大小与下列因素有关：

- 所考虑的设备的种类；
- 谐波次数  $h$ ；
- 所考虑的设备的额定功率  $S_{rj}$  和在 PCC 处的短路功率  $S_{sc}$  的比值。

表 3 给出了一般情况下差异因数的指示值,表 4 给出是带有电容滤波的不可控整流器时的指标值。

表 3 在一般情况下的差异因数指标值

$S_{rj}/S_{sc}$	$h$						
	3	5	7	11	13	17	19
$\leq 0.001$	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	—	—
0.002	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	—
0.005	0.6	0.5	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1
0.010	0.7	0.7	0.5	0.4	0.4	0.3	0.1
0.020	0.9	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5
$\geq 0.05$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

表 4 带有电容滤波的不可控整流器的差异因数指标值

$S_{rj}/S_{sc}$	$h$						
	3	5	7	11	13	17	19
$< 0.001$	1.0	0.9	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1
0.002	1.0	0.9	0.6	0.4	0.3	0.2	0.2
0.005	1.0	0.9	0.7	0.5	0.4	0.3	0.3
0.010	1.0	1.0	0.8	0.7	0.6	0.4	0.4
0.020	1.0	1.0	0.9	0.8	0.8	0.6	0.6
$> 0.05$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

注：数据变化是由于功率,电容和负荷的变化引起的。

当现有的(背景)谐波和新增加谐波的相角已经知道时,(在起加强作用的情况下, $k_{hj}$ 可能是负值),采用差异因数的方法是特别有用的。

### 6.2 第二求和法则

根据经验,对于谐波电压和谐波电流可以采用更一般的求和法则。第  $h$  次合成谐波电压的求和法则是：

$$U_h = \sqrt{\sum_i U_{hi}^\alpha} \quad (5)$$

式中： $U_h$ ——对所考虑的一组谐波源(概率统计值)计算出的(第  $h$  次)合成谐波电压的值；

$U_{hi}$ ——要进行合成的各单个谐波电压(第  $h$  次)的值；

$\alpha$ ——一个指数,主要取决于两个因素：

- 对不超过计算值的实际值所选择的概率值；
- 各次谐波电压的幅值和相位随机变化的程度。

考虑到：

——谐波发射合成主要指的是不超过 95% 的概率值。

组合成发射叠加的谐波源与 MV/LV 配电系统中较大负荷的发射相对应,它们把骚扰从一个电压等级传送到另一个电压等级,并把大量分散的低压负荷的发射综合成总的发射。

——低次的奇次谐波特点是:

——幅值:在网络中几乎到处都是比较大的,并且一般长时间地稳定存在。

——相角:具有相当窄的变化范围(在各谐波源处的变化有限,在没有低频谐振的情况下,这些有限的变化是由于在网络中传播的结果)。

——高次谐波的幅值和相角的变化范围较大。

根据当前得到的资料,可采用下列的一组系数:

表 5 谐波求和用的指数

$\alpha$	谐波次数
1	$h < 5$
1.4	$5 \leq h \leq 10$
2	$h > 10$

注:当已知谐波可能是同相(即相相差小于 90°)时,对 5 次及以上谐波应该用指数  $\alpha=1$ 。

## 7 MV 电力系统中畸变负荷的发射限值

### 7.1 第 1 级:骚扰发射的简化估算

在第 1 级,可以批准接入小用户或者畸变负荷数量有限的用户,而不必对发射特性或供电系统的响应进行详细的计算。

注 1:对于低压设备,见 GB 17625.1(每相输入电流  $\leq 16$  A),或者见 IEC 61000-3-4(每相输入电流  $> 16$  A)。

如果满足下列条件:

$$S_i/S_{sc} \leq 0.1\% \quad (6)$$

( $S_i$  = 第  $i$  个用户的协议功率,  $S_{sc}$  = PCC 处的短路功率),则可以接入用户设备范围内的任何畸变负荷,而不必作进一步的检验。

注 2:人们常常采用倒数比  $S_{sc}/S_i = R_{sc}$ ,式(4)与经验规则  $R_{sc} \geq 1000$  是等效的,畸变负荷可以接入系统而不需进一步检验。

如果不满足这个条件,下面推荐其他两个方法。

#### 7.1.1 以加权的畸变功率作为参考值

这种方法包括了计算表征用户工厂范围内畸变负荷大小的“加权畸变功率” $S_{Dwi}$ 。可以利用表 6 中关于常见产生谐波的负荷的加权因子  $W_j$  进行这种计算。

加权畸变功率的计算如下:

$$S_{Dwi} = \sum_j S_{Dj} \cdot W_j \quad (7)$$

式中:  $S_{Dj}$  ——第  $i$  工厂中的第  $j$  个畸变设备的功率。

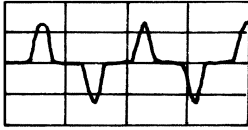
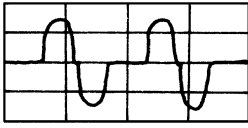


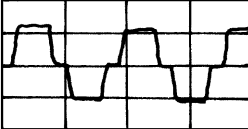
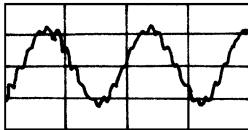
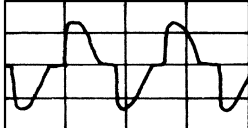
如果不知道产生谐波的负荷的特性,则可以假定加权因子为 2.5。

通过比较加权的畸变功率和在 PCC 处的短路容量可以决定在第 1 级接受的用户负荷。对于第 1 级接受的负荷可采用以下保守的判据:

$$S_{Dwi}/S_{sc} < 0.1\% \quad (8)$$

注:对于符合发射特性的某些类型的负荷,一些供电公司甚至宁愿采用更简单地只取决于负荷的额定功率(kVA)或额定电流的接受规则。附录 C 给出了一个例子。

表 6 关于产生谐波不同类型的设备的加权因子  $W_j$

接入到 LV, MV 或 HV 的典型设备	典型的电流波形	典型的 THD	加权因子 $W_j$
单相电源 (整流器和滤波电容)		80% (有高的 3 次谐波)	2.5
半导体变流器		部分负荷有高的 2 次, 3 次和 4 次谐波	2.5
6 脉动变流器, 电容滤波, 无串联电感		80%	2.0
6 脉动变流器, 电容滤波, 有 >3% 串联电感, 或者直流驱动		40%	1.0
6 脉动变流器, 有大型平滑波电抗器		28%	0.8
12 脉动变流器		15%	0.5
交流调压器		随点火角的大小变化	0.7

7.1.2 以相对谐波电流作为发射限值

当按“相对谐波电流”设定了合适的限值时,一般地,不会超过在总电压畸变中允许分担的部分。表 7 给出了这种限值的例子。

表 7 第 1 级中关于用户总负荷的相对谐波电流限值的指标值(给出的范围与网络的类型有关)

谐波次数 $h$	5	7	11	13	$\sqrt{\sum i_h^2}$
允许的谐波电流 $i_h = I_h / I_1 (\%)$	5~6	3~4	1.5~3	1~2.5	6~8

式中,  $I_h$  是用户引起的第  $h$  次谐波的总电流,  $I_1$  是对应于用户协议功率(基波)的均方根值电流。

注

- 1 对于协议功率大于 2 MVA 或  $S_i/S_{sc} > 2\%$  的用户,上述表格中的发射限值可能会高于第 2 级中的发射限值。如果打算连着使用第 1 级和第 2 级,则对这样的用户的发射限值应在第 2 级中评估。
- 2 如果用户使用了功率因数补偿电容和/或滤波器,则估算  $I_h$  时应该计及中压供电系统的谐波阻抗,而且应该按照第 2 级的程序对这种情况进行估算。

## 7.2 第 2 级:相对于实际网络特性的发射限值

在这一级中,对每一用户根据其设备在所连接的供电网络的总容量中所占的份额,分配合适的规划水平,这就保证了连接到该网络的所有用户发射引起的骚扰水平将不超过规划水平。

由于同时系数和谐波电流的相角差以及网络阻抗和未来的负荷,考虑网络的实际吸收能力可以允许比第 1 级更高的发射水平。

以下提出两种不同的方法,给出了一种更简化的评估方法和另一种更普遍的评估方法,它们分别是以两种求和法则作为基础的。

### 7.2.1 基于第一求和法则的简化方法

网络的总谐波电压中由第  $i$  个用户设备中的所有装置  $j$  相加产生的部分谐波电压  $U_{hi}$  可以根据用户设备中每个装置注入的谐波电流  $I_{hj}$ ,在 PCC 处的谐波阻抗  $Z_h$  和 6.1 中的差异因数  $k_{hj}$  进行评估:

$$U_{hi} = Z_h \cdot \sum_j k_{hj} \cdot I_{hj} \quad (9)$$

另一方面,也可根据用户规划注入电力系统的总谐波电流  $I_{hi}$ ,并利用总的差异因数  $k_{hi}$  来进行评估:

$$U_{hi} = Z_h \cdot k_{hi} \cdot I_{hi} \quad (10)$$

当然,一个用户特别提供的  $U_{hi}$  只可能是由所考虑的 MV 系统供电的所有负荷允许提供的总谐波电压  $G_{hMV}$  的一部分。

$G_{hMV}$  可以按 LV 规划水平  $L_{hLV}$  和“网络组成系数” $k_{hMV}$  的乘积来估算,该系数规定为以网络的部分谐波阻抗(见图 6)上的谐波电压降出现的那部分规划水平:

$$G_{hMV} = k_{hMV} \cdot L_{hLV} \quad (11)$$

一般地, $k_{hMV}$  可能在 0.4 和 0.7 之间变动。经常采用的折中值为 0.5。

令  $S_i$  为用户的协议功率, $S_t$  为 MV 网络可用的总功率,网络中由用户产生的总谐波电压的允许值为:

$$U_{hi} \leq G_{hMV} \cdot \frac{S_i}{S_t} \quad (12)$$

因此,当对于每一谐波次数  $h$  都满足这个条件时,允许按照第 2 级接入用户的设备。

### 7.2.2 基于第二求和法则的一般方法

#### 7.2.2.1 用户之间对总发射的分配

首先,必须应用式(5)来确定在特定 MV 系统中所有谐波源提供的总谐波电压。对于每一次谐波, MV 系统中实际的谐波电压是由上一级 HV 系统的谐波电压和连接至该 MV 系统的所有非线性负荷(包括下一级低压系统的非线性负荷,它们可以看作是该 MV 系统负荷的一部分)产生的谐波电压矢量合成的结果。这个总谐波电压不宜超过该中压系统的规划水平。

#### 第一种近似估算法

令: $G_{hMV+LV}$ ——MV 系统中本地 MV 和 LV 负荷提供的可接受的第  $h$  次谐波总电压(以基波电压的百分数表示)( $G_{hMV+LV}$  可以根据谐波电流乘以谐波阻抗来计算);

$L_{hMV}$ ——MV 系统中  $h$  次谐波的规划水平;

$L_{hHV}$ ——上一级 HV 系统中  $h$  次谐波的规划水平;

$T_{hHM}$ ——第  $h$  次谐波从上一级 HV 系统到 MV 系统的传递系数;

$\alpha$ ——求和法则的指数(见表 5),应用式(5)得:

$$G_{hMV+LV} = \sqrt{\alpha} L_{hMV}^{\alpha} - (T_{hHM} L_{hHV})^{\alpha} \quad (13)$$

进行初步估算时,在MV系统中来自上一级HV系统的传递系数 $T_{hHM}$ 常常令其等于1。然而,实际上由于有下一级网络元件,它们可能小于1(例如2/3);或者由于谐振它们可能大于1(典型值为1~3之间)。

作为例子,在一特定的中压系统中采用了式(13),假定对所有的谐波频率,来自上一级HV系统的传递系数都等于1,并且假定HV和MV系统的规划水平为表2中的值。在表8中给出了结果。为了举例说明在5次谐波附近谐振的情况,以下用三个在5次谐波下的不同的传递系数来表明式(13)的应用:

$$\begin{aligned} T_{5HM} = 1 &\rightarrow G_{5MV+LV} = [5^{1.4} - (1 \times 2)^{1.4}]^{1/1.4} = 4\% \\ T_{5HM} = 2 &\rightarrow G_{5MV+LV} = [5^{1.4} - (2 \times 2)^{1.4}]^{1/1.4} = 2\% \\ T_{5HM} = 3 &\rightarrow G_{5MV+LV} = [5^{1.4} - (3 \times 2)^{1.4}]^{1/1.4} = 0\% \end{aligned}$$

从以上结果清楚地表明:当从上一级系统到MV系统的传递系数大于1时,使用这种方法应该特别小心。还应记住:传递系数不但依赖于谐波次数和位置,而且还可能随时间变化(例如,由于电容器组的操作)。

当MV系统的规划水平等于HV-EHV系统的规划水平时,即当 $h=4,6,12,15$ 和21时,只应用式(13)将导致MV用户提供的谐波成分为零的结果。在这种情况下,应该在系统的不同电压等级之间分配合理分担的谐波发射。

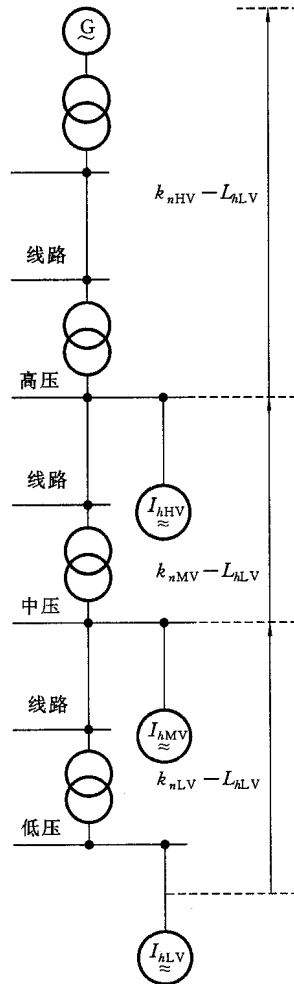


图6 在不同电压等级间利用  $k_{nHV} + k_{nMV} + k_{nLV} = 1$  分配容许谐波电压发射的简化方法  
(例如:  $k_{nHV} = 0.3, k_{nMV} = 0.5, k_{nLV} = 0.2$ )

表 8 HV 系统的传递系数为 1 时,可接受的 MV 和 LV 负荷产生的中压总谐波电压  $G_{\Delta MV+LV}$

非 3 倍次数的奇次谐波		3 倍次数的奇次谐波		偶次谐波	
谐波次数, $h$	谐波电压, %	谐波次数, $h$	谐波电压, %	谐波次数, $h$	谐波电压, %
5	4	3	2	2	0.1
7	2.8	9	0.4	4	0
11	2.6	15	0	6	0
13	2	21	0	8	0
17	1.2			10	0
19	0.7			12	0
23	1				
25	1				

第二种近似估算法

如果负荷中的居民用电部分相对较小,那么把 LV 负荷考虑为总的 MV 负荷的一部分是一种好的近似方法。然而,当出现很大的居民用电负荷时,这种方法是不利的,因为假定了居民负荷与商业/工业畸变负荷是同时使用的。因此,最好采用以下更准确的方法:

令:

$G_{\Delta MV}$ ——MV 系统中直接以 MV 供电的本地负荷提供的可接受的第  $h$  次谐波总电压(以基波电压的百分数表示);

$S_{MV}$ ——通过 HV/MV 配电变压器直接以 MV 供电(当系统满负荷时)的负荷的总功率;

$S_{LV}$ ——经同一 HV/MV 配电变压器直接以 LV 供电(在系统满负荷时)的负荷所取得的总功率;

$F_{ML}$ ——MV 和 LV 配电系统的两种畸变(混合)负荷之间的同时系数。

$F_{ML}$  的值可以从负荷曲线中得到,它对应于 MV 负荷峰值期的 LV 负荷的总功率,用以 LV 峰值负荷为基准的 p.u 值表示。这个系数考虑在 MV 和 LV 畸变负荷产生的最大谐波之间不存在重叠。这是由于在 MV 和 LV 负荷之间的负荷曲线和负荷特性的差异所致。例如,对  $F_{ML}$  的估算如下(参见图 7):

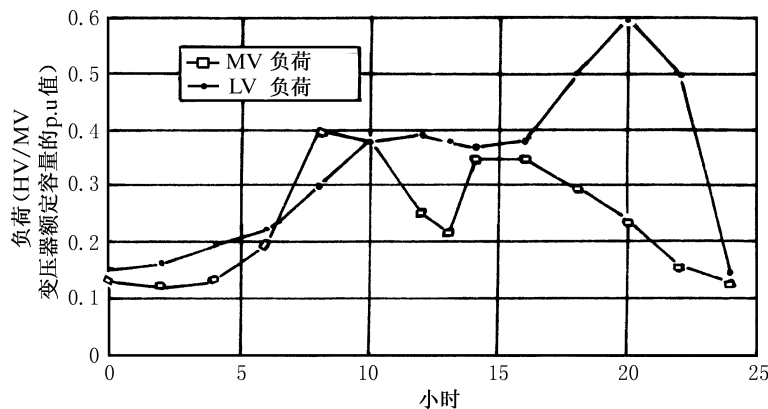


图 7 中压配电系统的日负荷曲线

——在 MV 负荷峰值时 LV 负荷所取得的总功率;在上午 8 时为 0.3p.u.;

——LV 峰值负荷;在下午 8 时为 0.6p.u.;

—— $F_{ML} = \frac{0.3}{0.6} = 0.5$  (虽然, 一个更接近实际的的分析表明在上午 10 时比上午 8 时为更临界的状态, 但  $F_{ML}$  的更好的估计值是  $0.39/0.6 = 0.65$ )。因此, 可用式(14)代替式(13):

$$G_{hMV} = \sqrt[\alpha]{\frac{S_{MV}}{S_{MV} + S_{LV} \cdot F_{ML}} [L_{hMV}^{\alpha} - (T_{hHM} L_{hHV})^{\alpha}]} \quad (14)$$

注: 在第 2 级,  $F_{ML}$  的评估应该保持恒定, 以便计及将来畸变负荷特性叠加时不利的变化影响。

### 7.2.2.2 各用户的谐波发射限值

对每一用户而言, 只允许其发射为总发射限值  $G_{hMV+LV}$  或  $G_{hMV}$  的一部分。一个合理的建议是按协议功率  $S_i$  和系统总供电功率  $S_t$  ( $S_t$  一般是大于或等于由所考虑的 MV 系统供电的所有用户的全部协议功率的和) 之间的比例选取这个部分。这个准则是和用户的协议功率常常与它在电力系统中分担的投资费用相联系这个事实有关的。

#### 第一种近似估算法

在  $E_{Uhi}$  是可接受的用户谐波电压发射水平的情况下, 应用式(5)得出:

$$\sqrt[\alpha]{\sum_i E_{Uhi}^{\alpha}} = G_{hMV+LV} \quad (15)$$

或

$$\sum_i E_{Uhi}^{\alpha} = G_{hMV+LV}^{\alpha} \quad (16)$$

如果各次谐波的发射限值与用户的协议功率  $S_i$  成正比, 则式(16)可用下式表示:

$$E_{Uhi}^{\alpha} = G_{hMV+LV}^{\alpha} \cdot \frac{S_i}{S_t} \quad (17)$$

或者最终结果为:

$$E_{Uhi} = G_{hMV+LV} \cdot \sqrt[\alpha]{\frac{S_i}{S_t}} \quad (18)$$

式中:  $E_{Uhi}$ ——可接受的 MV 系统直接供电的第  $i$  个用户谐波电压发射水平, %;

$G_{hMV+LV}$ ——可接受的 MV 和 LV 负荷提供的 MV 系统中第  $h$  次谐波电压, 如式(13)所给出的;

$S_i = P_i / \cos \phi_i$ ——第  $i$  个用户的协议功率;

$S_t$ ——在 MV 网络中总可用功率;

$\alpha$ ——求和法则中的指数(见表 5)。

注: 令  $S_{tr}$  为 HV/MV 变压器的功率, 显然可以得到:

$$S_t = \sum S_{tr} \quad (19)$$

然而, 有一些 MV 系统实际可以得到的部分功率是由相当于非线性负荷的(谐波)源提供的。令  $S_{nls}$  是这样一些非线性发生器的功率, 则网络的“潜在的总畸变功率”变成成为:

$$S_t = \sum S_{tr} + 2 \sum S_{nls} \quad (20)$$

(关于在式(20)中出现系数 2 的理由是容易理解的, 因为应考虑一种极端的情况, 所有的功率是由非线性源提供的, 并且只给非线性负荷供电, 那么骚扰的总功率为总可用功率的 2 倍。)

在这种情况下, 建议使用这种“修正过的总可用功率”。

#### 第二种近似估算法

正如 7.2.2.1 中已经说过的, 一种更精确的方法考虑到 LV 和 MV 负荷可能不会同时出现这种事实。在这种情况下  $G_{hMV}$  由式(14)而不是由式(13)给出,  $S_t$  将由  $S_{MV}$  代替。而且所有的 MV 畸变负荷也可能不是同时运行的, 所以式(18)变成成为:

$$E_{Uhi} = G_{hMV} \sqrt[\alpha]{\frac{S_i}{S_{MV}} \cdot \frac{1}{F_{MV}}} \quad (18')$$

式中： $E_{Uhi}$ ——容许的第  $i$  个直接以  $MV$  供电的负荷的第  $h$  次谐波发射限值(%)；  
 $G_{hMV}$ ——直接以  $MV$  供电的当地负荷在  $MV$  系统提供的可接受的第  $h$  次谐波总电压，见式(14)；  
 $S_i = P_i / \cos \phi_i$ ——第  $i$  个用户的协议功率；  
 $S_{MV}$ ——通过  $HV/MV$  配电变压器直接以  $MV$  供电(在系统满载时)的负荷的总功率；  
 $F_{MV}$ —— $MV$  同时产生畸变的负荷的同时系数。 $F_{MV}$  典型的值在 0.4 和 1 之间；  
 $\alpha$ ——求和法则中的指数(见表 5)。

### 第三种近似估算法

在以上确定各个发射限值的规则的建议中，没有考虑网络的短路水平的变化。当负荷接入到公共母线时(为了降低故障水平在母线和供电线之间接有串联电抗器时，“母线”被理解为电抗器的供电侧的点)，短路水平不会显著地变化，迄今分配发射限值的方法是合理的。

对于带有短电缆(<10 km)和短的架空线路(<5 km)的配电系统就是这样一种情况。这些情况是为相当大的负荷供电(特别是工业负荷等)的典型网络状况。

对带有长的电缆和架空线路的配电系统，且负荷又沿供电线路分散分布时，上述方法可能导致规定的谐波电流限值过于严格，从而对接于线路远端的用户不利，因为线路远端的短路水平可能显著地低于变电站母线处的短路水平。为了对这种影响进行补偿，在附录 D 中提出了一种可接受的在各  $MV$  负荷中间分配总发射  $G_{hMV}$  的方法。

附录 E 举例说明了适用于附录 D 中建议的特定情况的方法，并作为制定一般用途的发射规则。因此，供电公司可以使用这些方法来确定自己的谐波电流发射限值以适合配电系统基本特性的要求。

注

- 1 关于总谐波畸变率的发射限值可以选定为对 5 次谐波计算的发射限值的 1.3 倍。
- 2 对于产生畸变的设备，即使目的在于限制网络中的谐波电压，最好还是规定谐波电流限值。供电公司有责任提供关于网络阻抗随频率变化的数据以便能够把这些限值用谐波电流来表示：

$$E_{1hi} = \frac{E_{Uhi}}{Z_h} \quad (21)$$

式中： $Z_{1hi}$ ——可接受的第  $i$  个用户  $h$  次谐波电流发射水平；

$Z_h$ ——PCC 处与频率有关的网络阻抗。

- 3 第  $h$  次谐波时的背景水平( $B_{hMV}$ )偶而会高于正常的分配水平(正常的分配水平与  $[(S_t - S_i)/S_t]^{1/\alpha}$  成正比)，建议考虑这种情况，以免超过规划水平。因此，在式(13)或式(14)中要用  $(L_{hMV}^{\alpha} - B_{hMV}^{\alpha})^{1/\alpha}$  代替  $L_{hMV}$ 。
- 4 对于协议功率较低的用户，式(18)可能给出不合理的严格限制。如果在某些谐波次数下的可接受的谐波电压发射水平变得小于 0.1%，那么就应该指定其等于 0.1%(对于有出现噪声电压干扰的危险或者对应于被证实可能要受到更加严格限制的某遥控频率的情况除外)。

### 7.3 第 3 级 在特殊情况和根据不足的情况下接受较高的发射水平

应当指出：很多用户因为他们没有显著数量的畸变负荷，所以，并不产生显著的谐波，而且网络的某些有效的供电容量在很长的时间里从未被利用。

因此，只采用第 1 级和第 2 级进行评估可能导致把谐波电压的值限制得过分地低于规划水平，从而出现了一个裕量。

为了维护本标准的基本原则和允许灵活的解释，供电公司可以在适当的时候使用这个可用的裕量。然而，只有在特殊的环境和在根据不足的条件下，才能接受高于正常发射限值的用户。

为了取消那些也许是根本不必要的投资，第 3 级评估是重要的。这就意味着在计及现有的背景畸变的条件下应当对所考虑设备的接入和预期的发射情况进行仔细的研究，并要考虑将来扩建滤波设备的可能性。

8 HV 电力系统中畸变负荷的发射限值

8.1 第 1 级：骚扰发射的简化评估

第 1 级的目标是提供一个简单判断畸变负荷接入的准则，从而避免了详细的计算，对于 HV 和 EHV 系统，把允许的负荷的畸变功率( $S_{Di}$ )和在 PCC 处的网络短路功率( $S_{sc}$ )联系起来是合理的。例如，可以建议取下列值作为第 1 级的限值：

$$\frac{S_{Di}}{S_{sc}} \leq 0.1\% \sim 0.4\%(\text{HV}) \text{ 或者 } 0.1\% \sim 0.2\%(\text{EHV}) \quad (22)$$

8.2 第 2 级：相对于实际网络特性的发射限值

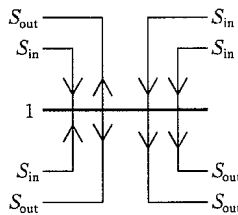
8.2.1 总可用功率的评估

令  $S_i$  为第  $i$  个设备的额定视在功率(MVA)， $S_t$  为在 PCC 处网络的总可用功率(总供电容量)，则  $S_i/S_t$  是以下第 2 级决定发射限值过程中的一个基本量。

第一种近似估算法

在 HV 和 EHV 网络中估算  $S_i$  比 MV 网络更加困难。建议的估算方法如下：当考虑一个连接到给定的 HV 变电站中的工业用户时，基本的数据是在最大需求目的变电站输入、输出功率的记录(或考虑将来网络发展时的预测值)，并且可简单地估算为：

$$S_t = \sum S_{in} = \sum S_{out} \quad (23)$$



HVDC 联络线是一个比较特殊的例子，因为它既能向变电站馈入功率，而同时它又相当于一个畸变负荷。向变电站馈送无功功率的无功静止补偿器(SVC)也会出现同样的问题。解决的办法是建议分别考虑连接到变电站的所有可能的 HVDC 联络线和 SVC，并可估算为：

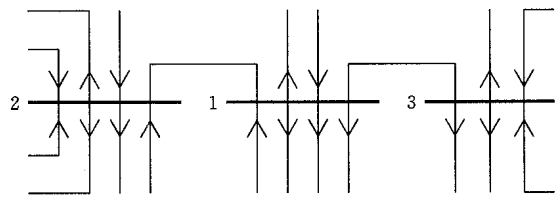
$$S_t = \sum S_{out} + \sum S_{HVDC} + \sum S_{SVC} \quad (24)$$

式中， $S_t$  成为“可能畸变的总功率”，将其称之为“修正的总可用功率”比称为“总供电容量”要好。而  $S_{out}$  不包括任何  $S_{HVDC}$  或  $S_{SVC}$ 。

这种方法的基本假定是每个  $S_{in}$  是纯正弦形的注入功率，而每个  $S_{out}$  是可能有畸变的消耗功率。实际上，可预见到  $S_{in}$  不像假定的那样为纯正的正弦形，而且同时  $S_{out}$  也比假定的畸变程度要小些。因此，估算总体上仍为合理。

第二种近似估算法

如果在所考虑的变电站或可能在其周围有大型的畸变设备出现，那么简化估算方法可能是不正确的。若有怀疑，建议按下述方法处理：



——令节点 1 为所考虑的节点,节点 2,3,⋯为位于第 1 个节点附近的其他节点, $S_{t1}, S_{t2}, S_{t3}, \dots$  的值按式(24)进行计算,计算时忽略所有这些节点中两两节点之间的功率潮流  $S_{out}$ 。

——对每一谐波次数  $h$ , 计算影响系数  $K_{i2-1}, K_{i3-1}, \dots$  (影响系数  $K_{i,j-1}$  是当在第  $j$  节点处施加 1p.u (标么值) 的  $h$  次谐波电压时在  $i$  节点处产生的  $h$  次谐波电压,通常需要通过计算机程序来计算  $K_{i,j-1}$ )。

——式(24)将由下式代替:

$$S_t = S_{t1} + K_{i2-1}S_{t2} + K_{i3-1}S_{t3} + \dots \quad (24')$$

只要  $K_{i,j-1}S_{tj}$  与  $S_{t1}$  相比仍然是有意义的,就把它加到  $S_{t1}$  上。显然,在应用(24')时  $S_t$  是与频率有关的。

### 8.2.2 单个畸变设备的发射限值

对每一谐波次数  $h$ , 将允许每个畸变设备  $i$  按照它的功率 ( $S_{i-MVA}$ ) 与网络修正的总可用功率 ( $S_t$ ) 之间的比例提供一个基于规划水平 ( $L_{AHV}$ ) 的发射限值 ( $E_{Uhi}$ )。若假定来自几个谐波源的谐波按算术和法则相加,则计算式可简化为:

$$E_{Uhi} = L_{AHV} \cdot \frac{S_i}{S_t} \quad (25)$$

事实上,实际的若干个谐波源相加的结果一般总是比每个谐波分量最大值的算术和要小,至少对于次数大于 4 的谐波是这种情况(见第 3 章)。因此,式(25)变成:

$$E_{Uhi} = L_{AHV} \sqrt[\alpha]{\frac{S_i}{S_t}} \quad (26)$$

式中:  $E_{Uhi}$ ——第  $i$  个非线性设备第  $h$  次谐波的发射限值;

$L_{AHV}$ ——HV 或 EHV 系统中第  $h$  次谐波的规划水平(见表 2);

$S_i$  是:

——HVDC 站的 MVA 额定值,或者

——SVC 的 Mvar 额定值,或者

——用户的 MVA 额定值,取决于它的协议功率  $P_i$  和协议功率因数  $\cos \phi_i$  ( $S_i = P_i / \cos \phi_i$ );

$S_t$ ——PCC 处修正的网络总可用功率,见式(24)或(24');

$\alpha$ ——求和法则指数(见表 5)。

否则,要采用一个更加准确的方法(类似于在 MV 中引出的式(18'))

$$E_{Uhi} = L_{AHV} \sqrt[\alpha]{\frac{S_i}{S_t} \frac{1}{F_{HV}}} \quad (26')$$

式中:  $F_{HV}$ ——同时发生畸变的 HV 负荷的同时率( $F_{HV}$  的值取决于负荷和系统的特性,其典型值在 0.4 与 1 之间)。

注

1 谐波总畸变率的发射限值可以定为约等于 5 次谐波计算的发射限值的 1.3 倍。

2 由于在某些频率下谐振现象的影响,在网络中远离连接点处的某些点可能出现较高的谐波电压。通过估算影响系数  $K_{h,j-1}$  可以计及这些影响,这里下标中的  $i$  指的是连接点,而  $j$  点指的是网络的其他点。如果对于一给定的谐波次数  $h$ , 有某些  $K_{h,j-1}$  的值大于 1,则必须用它们中间的最大值,以便在式(26)中用  $L_{AMV}/K_{h,j-1}$  代替  $L_{AMV}$ 。

3 在某些谐波频率下,必须要考虑到偶而会出现背景谐波电压水平 ( $B_h$ ) 比标称的份额要高(标称的份额与  $[(S_t - S_i)/S_t]^{1/\alpha}$  成正比),以免超过规划水平。因此,在式(26)中要用  $(L_{AMV} - B_h^\alpha)^{1/\alpha}$  来代替  $L_{AMV}$ 。

4 在某些情况下,由式(26)给出的发射限值可能低得不符实际,因而,过分需要采用第 3 级的程序。为了避免出现那样的情况,需要考虑如下的问题:

——如果在某些谐波次数,可接受的发射水平小于 0.1%,则应该把  $E_{Uhi}$  定为等于 0.1% (除非有危险的噪声电压干扰出现或者它与遥控频率一致,对于这些情况,采用更严格的限制可能是合理的)。

——如果供电公司知道连接到网络中的某些部分的负荷从未发生过畸变,则可能要从式(24)或(24')中减去与非畸变功率相对应的项。

- 5 即使其目的在于限制网络中的谐波电压,最好是对畸变设备规定谐波电流限值。供电公司应负责提供有关与频率相关的网络阻抗的数据,以便能够以谐波电流的形式表达上述的限值:

$$E_{\text{th}} = E_{\text{Uhi}}/Z_{\text{h}} \quad (27)$$

式中:  $E_{\text{th}}$ ——可接受的第  $i$  个用户的第  $h$  次谐波电流的发射水平;

$Z_{\text{h}}$ ——与频率相关的网络阻抗。

然而,当规定了电流限值时,对特别低的阻抗值将不予考虑,最低的阻抗值通常是与谐振有关的,与这些特殊频率有关的谐波电压可能会超过网络其他部分的规划水平。因此,在式(27)中所用的阻抗值应该比式(28)中的  $Z_{\text{min}}$ (在缺少更多指定的数据的情况下可能采用的值)要高:

$$Z_{\text{min}} = K \frac{Z_{\text{surge}}}{N} \quad (28)$$

式中,系数  $k=0.5\sim 1$ ,  $Z_{\text{surge}}$  是线路的特征阻抗,  $N$  是连接到 PCC 处的线路的总数。

### 8.3 第3级 在特殊情况和根据不足的情况下接受较高的发射水平。

应当指出:很多用户因为他们没有显著数量的畸变负荷,所以并不产生显著的谐波,而且网络的某些有效的供电容量在很长的时间里从未被利用。

因此,只采用第1级和第2级进行评估可能导致把谐波电压的值限制得过分地低于规划水平,从而建立了一个裕量。

为了维护本标准的基本原则和允许灵活的解释,供电公司可以在适当的时候使用这个可用的裕量。然而,只有在特殊的环境和在根据不足的条件下,才能接受高于正常发射限值的用户。

为了取消那些也许是根本不必要的投资,第3级评估是重要的。这就意味着对用户的接入应当进行仔细的研究,包括现有背景畸变和所考虑设备的预期发射情况,并要考虑将来扩建滤波设备的可能性。

## 9 谐间波的发射限值

谐间波  $U_{\mu}$ (这里  $\mu$  不是基波频率的整倍数)必须要限制到:

——在两倍基波频率以下时,为了避免白炽灯和荧光灯(薄管)的闪烁问题[3,4],建议把谐间波限制到 0.2%;

——如果超过最小的工作电压(0.3%),可能会骚扰纹波控制接收机[5];

——在频率最高为 2.5 kHz 的频率范围内,为了避免如电视机、感应旋转电机和欠频继电器的可听噪声和振动等问题,不宜超过 0.5%[6];

——在 2.5 kHz~5 kHz 的频率范围内,为了避免如无线电接收机和其他音频设备中的可听噪声,不宜超过 0.3%。

——在有非线性负荷的情况下,一个频率为  $f_{\mu}$  的谐间波伴随着频率为  $[f_{\mu} \pm 2 \cdot n \cdot (\text{基波频率})]$  的边带分量,式中  $n=1,2,3,\dots$ ;  $[f_{\mu} \pm 2 \cdot n \cdot (\text{基波频率})]$  分量的幅值可能十分接近所考虑的谐间波的幅值[7]。闪烁的频带最高将扩展到为 4 倍基波频率,对于有关纹波控制感兴趣的频率,也是不同于纹波控制频率的两倍基波频率。

就这些限值而言,关于谐间波的规划水平等于 0.2%。

只有当谐间波的频率和相位相同时,谐间波电压才能算术相加。但这些条件很少能被满足,且出现的时间很短。由于这个原因,实际上谐间波电压合成值不可能大于两个中最高值的两倍。

如果某一台设备的谐间波低于 0.1%,将不考虑其有骚扰。

如果允许较高的谐间波值,则谐间波频率可能不超过闪烁临界值,并且可能不在纹波控制频率(及其边带频率宽为两倍基波频率)的范围内。在某些情况下,必须要考虑相邻的供电公司的纹波控制频率。

## 10 干扰电话的发射限值

本章引出由于电力系统谐波对电话所产生的干扰影响。

理论上,干扰影响取决于下列三个因素:

- 电力系统的影响；
- 电话系统的敏感度；
- 两个系统之间的耦合。

由于这三个因素必然会引出有关所出现的干扰问题,并可能遇到各种各样的情况。对大多数欧洲国家来说,电话干扰是很少见的或者是情况特殊的(例如HVDC),也许除了某些斯堪第纳维亚地区的国家,如芬兰,过去曾经在HV线路和供乡村用的明线电话线之间出现过严重的电话干扰问题。然而,在北美,由于各种不同的原因(例如电力系统和电话系统可能共同使用相同的设备、大地返回路径或者在MV配电线路上使用多个中性点接地)在MV系统中经历过很多的干扰问题。在北美有关的标准中规定了电力线和电话线互相协调的推荐方法[8,9]。

本指导性技术文件中没有规定一般的规划水平或发射限值,这是因为电话干扰的问题非常特殊。因此,在可能出现电话干扰问题的地方应该由有关公用事业部门来规定这些限值。

## 附录 A

(提示的附录)

## “最不利阻抗曲线”法的例子

在英国,根据某些地区的测量确定了“最不利阻抗曲线”,如果利用这些经验曲线所作的计算表明某个负荷可以被接入系统,则这样做的风险率最小,如果计算得出的结果超过限值,则必须使用更准确的方法。

在低压系统中,最不利阻抗曲线是根据故障水平推导出的,并且把它看作是随谐波次数按线性关系变化的。

在 11 kV 系统,对于一典型的没有大型电容器组成的滤波器的城市变电站,最不利阻抗曲线如图 A1 所示。它是根据故障水平导出的,从 50 Hz 开始直到 400 Hz 时的阻抗值是沿着一条直线上升的,其数值为 2 倍基波阻抗与谐波次数的乘积。在这之后,它下降到另一条直线上,其数值为基波阻抗与谐波次数的乘积。

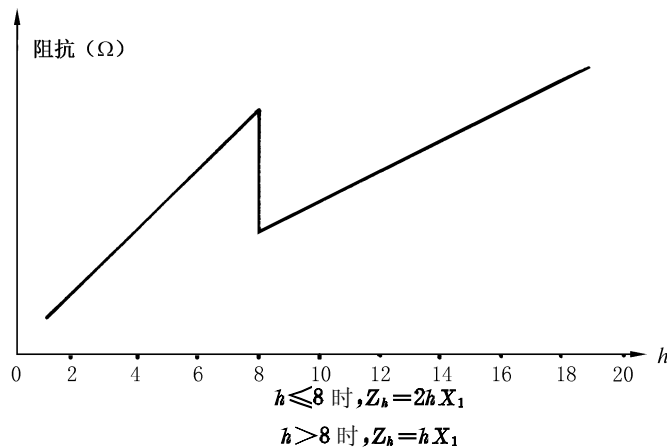


图 A1 11 kV 最不利阻抗曲线

在 33 kV,最不利阻抗值取为有最高达 800 Hz 时的故障水平直接推导出的阻抗值的 1.25 倍。当考虑此水平以上的频率时,也许需要根据实际的情况进行特殊的测量。

这种方法不能推广到 66 kV 及以上系统。

## 附录 B

(提示的附录)

## 手算 MV 网络 PCC 处谐波阻抗的例子(在德国用过的)

注:按照德国习惯,在某些方程式和图中,“k”表示短路,而“v”表示“公共耦合点”或“PCC”。

以下说明不使用扩展矩阵来计算各种频率下的阻抗的可能的两种不同方法:

——在 B3 中利用与网络结构有关的阻抗或导纳,把元件逐个地增加到网络模型中,最终得出每个谐波次数  $h$  下的阻抗  $Z_h$ 。原则上这种方法可以采用手工计算(用袖珍科学计算器从阻抗的逆求出导纳,或者反之),由于计算步数很多,特别当网络的等值模型是复杂的时候,所以建议采用计算机。

——在 B4 中,采用根据网络特性数据推导出的简化等值电路。确定了依赖于频率的两个辅助值  $D$  和  $N$ ,指标  $D$  代表了网络的阻尼特性,而  $N$  与偏离网络第一并联谐振频率的程度有关。可以只通过一个方程式,根据  $h, X_{k1}, D$  和  $N$  计算出所有频率下的阻抗  $Z_h$ 。

**B1 容性无功功率**

评估谐振所需的容性无功功率是由线路的无功功率  $\sum Q_L$  和补偿电容器的无功功率  $\sum Q_{ca}$  组合而成的：

$$Q_c = \sum Q_{ca} + \sum Q_L \quad (B1)$$

表 B1 电缆的容性无功负荷 ( $Q'_{cab}$ ) 和架空线路的容性无功负荷 ( $Q'_{OL}$ ) kvar/km

截面/mm <sup>2</sup>	120	150	185	240
5.8/10 kV 电缆				
纸绝缘	14	16	16	20
XLPE 绝缘	10	11	12	12
11.6/20 kV 电缆				
纸绝缘	50	50	55	70
XLPE 绝缘	30	30	35	40
架空线路				
10 kV	0.3			
20 kV	1.1			

利用表 B1 的标准值，线路的容性无功功率可按下列式计算：

$$\sum Q_L = \sum (Q'_{cab} \cdot l) + \sum (Q'_{OL} \cdot l)$$

式中： $l$ ——电缆或架空线路的长度，km。

容性无功功率  $\sum Q_{ca}$  的估算是非常困难的，因为它是与异步电机、照明等设备的数量有关的分布电容的函数。

**B2 网络的负荷  $P_N$**

靠近第一谐振点频率处的阻抗大小取决于网络元件的衰减作用，这些电阻可能是负荷或者是网络阻抗的电阻部分。就电动机来说，只有在涌流条件下阻抗的电阻部分才是有效的。当评估网络的衰减作用时为了保证其结果位于安全侧，一开始就应该忽略电动机的有功功率。

当计算负荷的衰减作用时，必须要考虑网络负荷  $P_N$  的偏差。低的衰减和高的阻抗是与网络的最小有功功率  $P_{Nmin}$  有关系的。

在公用配电系统中， $P_{Nmin}$  可以按负荷的三分之二估算，它是以低负荷（约三分之一是运行的电动机）的倍数给出；对于工业化网络，一般不可能进行估计，因为有功功率  $P_{Nmin}$  的衰减部分可能显著地较低。

**B3 通过逐次地增加整个接线图的每个元件的值来计算网络阻抗的例子**

图 B1 和图 B2 所示为一个实例网络的电路图，应当指出，变压器是通过一根长电缆连接到 MV 网络的母线上的，建议不要忽略它的阻抗。

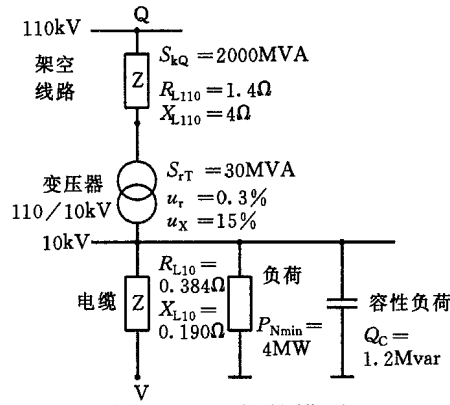


图 B1 网络的模型

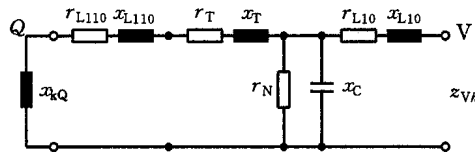


图 B2 等值电路

为了避免各电压等级的阻抗转换,网络所有元件的阻抗  $Z$  都是与各自的标称电压  $U_N$  的平方有关的:

$$r = \frac{R}{U_N^2}; x = \frac{X}{U_N^2}; z = \frac{Z}{U_N^2} \quad (B2)$$

这些阻抗的单位通常是%/MVA。

对图 B2 中的等值电路的元件参数可计算如下:

$$\begin{aligned} h \cdot X_{KQ} &= h \cdot 0.05 \quad \%/MVA \\ r_{L110} &= 0.012 \quad \%/MVA \\ h \cdot X_{L110} &= h \cdot 0.033 \quad \%/MVA \\ r_T &= 0.01 \quad \%/MVA \\ h \cdot X_T &= h \cdot 0.5 \quad \%/MVA \\ r_N &= \frac{1}{P_N} = \frac{100\%}{4MW} = 25 \quad \%/MVA \\ \frac{x_c}{h} &= \frac{-1}{h \cdot Q_C} = \frac{-100\%}{h \cdot 1.2MVA} = -\frac{83.3}{h} \quad \%/MVA \\ r_{L110} &= 0.384 \quad \%/MVA \\ h \cdot X_{L110} &= h \cdot 0.19 \quad \%/MVA \end{aligned}$$

等值电路的阻抗是对每个感兴趣的频率的谐波阻抗  $Z_h$  给出的,在表 B2 中给出了  $h=5$  时的详细计算说明,从该电路中可以推导出元件参数的求和。

类似地,对每个感兴趣的谐波的阻抗  $Z_h$  都可以计算出来,如表 B3 所示。

表 B2 在 PCC(V)处计算  $h=5$  时的网络阻抗  $Z_h$

电路元件	阻抗 %/MVA			导纳 MVA/%	
	实部	虚部		实部	虚部
$X_{KQ}$	—	0.250			
$r_{L110}, X_{L110}$ (串联)	0.012	0.165			
$r_T, X_T$ (串联)	0.010	2.500			
$X_{KQ}, r_{L110}, X_{L110}, r_T, X_T$ 串联的和	0.022	2.915	⇒	0.0026	-0.343
$r_N$	25.0	—	⇒	0.04	—

表 B2 (完)

电路元件	阻抗 %/MVA			导纳 MVA/%	
	实部	虚部		实部	虚部
$X_C$	—	-16.6	⇒	—	0.060
在母线处总和	0.52	3.45	←	0.0426	-0.283
$r_{L10}, X_{L10}$ (串联)	0.38	0.95			
在 PCC 点 V 处的总和	0.90	4.40			
在 PCC 点 V 处的 $Z_{Vh}$ 的绝对值	4.5				

表 B3 按不同谐波次数计算的结果

$h$	5	7	11	13	17	19
$Z_{Vh} (\%/MVA)$	4.5	7.4	22.7	20.5	6.4	3.9

**B4 用简化等值电路计算网络的阻抗**

在很多情况下,利用简化的等值电路表达式足以推导出网络阻抗,如果产生谐波的设备 and 有效电容直接连接到或靠近 PCC 处,那么这种方法是被容许的。对图 B4 的电路,可以按下式估算有关的谐波阻抗:

$$Z_{Vh} = \frac{h \cdot X_{kV}}{\sqrt{D^2 + N^2}} \quad (B3)$$

辅助值  $D$  和  $N$  包括了 50 Hz 时的阻抗  $r_{kV}$  和  $X_{kV}$  以及网络的容性无功功率  $Q_C$  和有功功率  $P_N$  (见 B1 和 B2)。

辅助值  $N$  是通过考虑每一谐波频率下网络的容性无功功率和网络阻抗的感抗部分来计算的:

$$N = 1 - h^2 \cdot X_{kV} Q_C \quad (B4)$$

辅助值  $D$  代表了电阻的衰减作用,是通过考虑网络的有效功率和短路阻抗的电阻分量来估算的:

$$D = h \cdot X_{kV} \cdot P_N + \frac{r_{kV}}{h \cdot X_{kV}} \quad (B5)$$

阻抗值可根据负荷  $P_N$  的衰减部分计算,它们位于图 B5 的阴影区内。

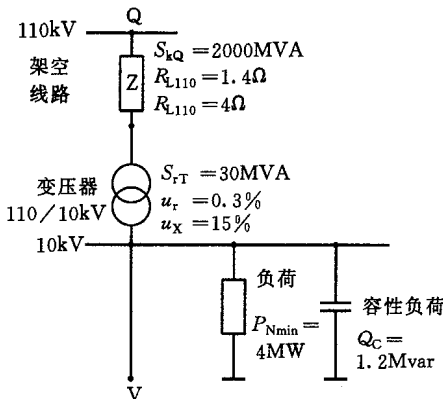


图 B3 网络的模型

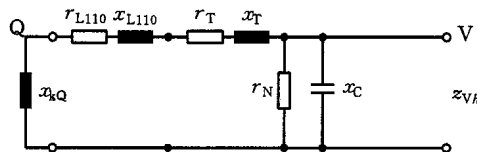


图 B4 等值电路

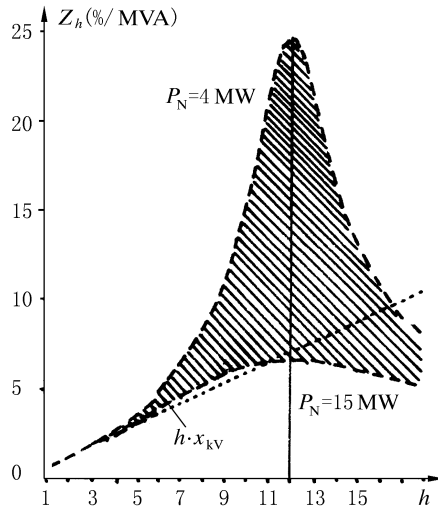


图 B5 频率  $\geq 50$  Hz 时的相对阻抗

网络阻抗(见图 B3):  $r_{kv} = 0.02\%/MVA$ ;  $x_{kv} = 0.58\%/MVA$ 。

容性无功功率:  $Q_c = 1.2$  Mvar。

最大阻抗出现在网络第一并联谐振的附近:

$$h_{res} = \frac{1}{\sqrt{Q_c \cdot X_{kv}}} \approx \sqrt{\frac{S_k}{Q_c}} \quad (B6)$$

对照式(B4),按下式估算辅助值  $N$ :

$$N = 1 - (h/h_{res})^2 \quad (B7)$$

对很多公用 MV 网络,平均衰减可以估算为:

$$D \approx h_{res} \cdot 0.04 \quad (B8)$$

可以利用图 B4 的简化电路图按式(B3)估算在  $1 \leq h \leq (1.5h_{res})$  范围内的谐波阻抗。

当频率高于  $(1.5h_{res})$  时利用式(B3)的计算是不准确的,因为在这个范围内可能发生二次谐振。

在很多公用 LV 网络中,在 PCC 点 V 处  $1 \leq h \leq 20$  范围内的相对阻抗为:

$$Z_{vh} = h \cdot X_{kv} \quad (B9)$$

当谐波次数  $h > 20$  时,用式(B3)计算是不准确的,因为在这个范围内可能发生二次谐振。

利用式(B9)计算出的阻抗值在图 B5 中是以直线画出的。

### 附录 C

(提示的附录)

#### MV 网络第 1 级限值特殊规定的例子

在英国曾采用过下列的方法(工程推荐标准 G5/3):

表 C1 英国 6.6 kV 和 11 kV 电力系统中第 1 级限值范围内的单台换流器和交流调压设备的最大容量

(工程推荐标准 G5/3)

kVA

三相换流器			交流三相调压器	
3 脉动	6 脉动	12 脉动	6 晶闸管	3 晶闸管/3 二极管
85	130	250*	150	100

\* 这个限值适用 12 脉动装置,以及总是作为 12 脉动装置运行的组合 6 脉动装置。

已对换流器和作为常规方式的调压器的谐波发射以及与 PCC 处的电压限值相对应的谐波负荷进行了计算。

根据对已知正常连接到系统的换流器和调压器平均台数的调查,并考虑到具有随机相角的谐波的叠加,把 6.6 kV 和 11 kV 系统可接受的总负荷除以 6,可以推导出单台设备的限值,见表 C1。

## 附录 D

(提示的附录)

### 负荷沿 MV 供电线路分布的一般情况:发射量的分配

#### D1 概述

这里概要地说明了尤其是那些常见的带有长的电缆( $\geq 10$  km)和/或架空线路( $\geq 5$  km)的中压配电系统,如果按本标准的 7.2 中给出的简单分配办法,将不能充分地利用实际系统吸收谐波能力的有利条件,并且,对沿供电线路连接的用户谐波电流发射限值可能会规定得过于严格。一般地,那种形式的分配方法对大多数的谐波次数(但不是所有的谐波次数)给出了太严格的发射限值。例如,在带有长的电缆和部分架空线路的配电系统中,发射限值等于或低于可以得到的容许发射的 50%~70%。

下面提出一种在各用户之间可被接受的分配总发射量的方法,这个方法考虑了更好地利用系统吸收谐波的实际能力,假若可行的话,则可避免供电线路远端用户的损失过大。

这个方法不仅适合于评估特别的情况(逐个情况地研究),而且也适用于在配电系统的规划阶段进行谐波发射的协调。同时此法对于制定通用的或者是适用于所考虑特定配电系统的发射标准都是有用的。当然,采用这个方法需要有详细的网络模型并用计算机计算。

注:此方法对所分析的电压等级上产生谐波谐振的任意网络结构(带有架空线路、电缆、并联电容器、负荷等)都是成立的。谐波系统响应考虑了任何形式的谐波谐振,并联谐振或串联谐振。如上所述,数字模拟是必要的。

这个方法主要依据以下三个步骤:

——第一步:对一给定的系统结构,评估沿 MV 供电线路的负荷注入的谐波电流的分布。下面假定一种普通形式(常规形式)的负荷分布并提出一个旨在避免供电线路远端用户损失过大(根据谐波发射的观点)的准则。

——第二步:估算沿供电线路的某类型基准谐波电流注入系统的谐波电压响应,据此,应记录被考虑的系统在何处发生过最高的谐波电压,以供确定发射限值之用。

——第三步:估算所有给被考虑负荷供电的节点处的谐波电流发射限值。这些限值将计及实际的系统谐波电压响应,并应遵照 MV 负荷容许的总发射的要求。

#### D2 确定沿供电线路的谐波注入的分布:基准的注入类型

尤其是供电线路具有长度 $\geq 10$  km 的 MV 网络,沿供电线路分布的谐波注入类型的选择,对网络吸收骚扰能力的利用和远离供电变压器的用户的损失有影响。如果把这种选择工作放在供电公司的报装规定中,则建议考虑沿供电线路分布的三种主要谐波注入类型:

- a) 恒定谐波电流注入;
- b) 恒定谐波功率注入;
- c) 与 PCC 处阻抗成反比的谐波电流注入(或恒定谐波电压)。

$$\text{令: } K_Z = \frac{Z_{1PCCi}}{Z_{1BB}} = \frac{I_{scBB}}{I_{scPCCi}} \quad (\text{D1})$$

式中:  $Z_{1BB}$ ——母线处的基波阻抗,  $\Omega$ ;

$Z_{1PCCi}$ ——沿供电线路第  $i$  个用户在 PCC 处的基波阻抗,  $\Omega$ ;

$I_{scBB}$ ——母线处的三相短路电流；

$I_{scPCCi}$ ——沿供电线路第  $i$  个用户 PCC 处的三相短路电流。

沿供电线路产生的谐波电流注入的关系式有：

a) 恒定谐波电流注入： $I_h = K$  (常数)；

b) 恒定谐波功率注入： $I_h = 1/\sqrt{K_Z}$ ；

c) 与 PCC 处阻抗成反比的谐波电流注入： $I_h = 1/K_Z$  或  $U_h = K$

对于具有供电线路长度  $\geq 10$  km 的 MV 配电网络，当评估方式从 a) 改变到 b) 再改变到 c) 时，则系统吸收骚扰的能力会逐步增加，但在供电线路远端允许的发射就会减少。

在上述关系式的基础上，确定了基准的谐波电流注入的类型。至于对准则 b) 和 a) 采用哪一种次序，取决于供电系统的特色和供电公司的政策。只要是与准则 b) 有关联的，则建议考虑以下问题：

——准则 b) 代表了按照吸收骚扰的观点，在最好地利用系统和不对远离供电变电站的用户规定太严格的限值这两个方面之间的兼顾考虑；

——通过使用准则 b)，缩小了网络阻抗中的差距，例如，对具有相同协议功率的用户，容许的谐波电压发射随着系统阻抗的减少而减少，因为受到骚扰影响的用户数量增加了。

### D3 系统对沿供电线路基准注入类型的谐波电流的谐波电压响应的估算

为了确定谐波电流注入对被考虑的系统的影响，必须估算沿供电线路的谐波电压分布图。这可以通过(在直接以考虑的系统电压供电的负荷点上)同时注入对所有感兴趣的谐波次数的某基准类型的谐波电流来得到。

注：一种可能的方法是估算每一个源的各次谐波对系统的影响，并把所有估算的单个影响按照假定的相加法则总加起来。

建议保留在所考虑的系统电压级每个  $h$  次谐波的最高谐波电压值。这些值用  $D_{U_h}$  来标记，以百分数的形式来表示。

例如，当采用恒定谐波功率的准则 b) 时，对连接在母线上的每个负荷注入单位谐波电流(譬如：1 A, 均方根值)，相当于把电流  $1/\sqrt{K_Z}$  (A, r. m. s.) 注入到沿供电线路连接到第  $i$  个 PCC 处的每个负荷上。

值得指出，这些谐波电流源表示了它的 PCC 处第  $i$  个负荷的净注入。因此，为了使估算用户的谐波注入引起的系统响应取得好的效果，建议忽略所考虑用户的对地阻抗(例如并联的负荷或滤波器的阻抗)，只有当研究来自该用户的注入电流时才加以考虑。

### D4 谐波电流发射限值的估算

这个方法的最后一步是估算为被研究负荷供电的所有节点的允许谐波电流注入(限值)，估算时要计及前述的系统谐波响应和以前假定的谐波注入沿供电线路的分布。

在恒定谐波功率(准则 b)) 的情况下，被研究系统各次谐波电流允许的发射限值可估算如下：

$$E_{I_{hMV}} = \left[ \frac{1(\text{A, r. m. s.})}{\sqrt{K_Z}} \right] \left( \frac{G_{hMV}}{D_{U_h}} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{F_{MV}}} \right) \quad (D2)$$

(单位为 A, r. m. s.)

注：

——在恒定谐波电流注入(准则 a)) 的情况下， $K_Z = 1$ ；

——在与 PCC 处阻抗成反比的谐波电流注入(准则 c)) 的情况下，用  $K_Z$  代替  $\sqrt{K_Z}$ 。

用对应于协议功率的基波电流的百分数表达的相应允许发射电流限值变成成为：

$$E_{I_{hiMV}}\% = 100 \cdot \frac{E_{I_{hiMV}}}{S_i / (\sqrt{3} \cdot U_N)} \quad (D3)$$

- 式中： $E_{I_{hiMV}}$ ——直接以 MV 供电的第  $i$  个负荷的  $h$  次谐波电流的容许发射限值(A, r. m. s.)；  
 $E_{I_{hiMV}}\%$ ——直接以 MV 供电的第  $i$  个负荷的第  $h$  次谐波电流的容许发射限值(协议电流的百分数)；  
 $G_{hiMV}$ ——当地直接以 MV 供电负荷发射的第  $h$  次总谐波电压的发射限值(%)；  
 $D_{U_{hi}}$ ——按式(D3)计算的由某类基准电流注入在所考虑系统中某处出现的第  $h$  次最高谐波电压(%)；  
 $K_{Zi}$ ——如式(D2)定义的  $Z_{IPCCi}/Z_{1BB}$  或  $I_{scBB}$  或  $I_{scPCCi}$ ；  
 $F_{MV}$ ——同时发生畸变的 MV 负荷的同时率(其值取决于负荷和系统的特性,平均值=0.4)；  
 $S_i = P_i / \cos\phi_i$ ——第  $i$  个用户的协议功率(kVA)；  
 $P_i = S_{MV} \cos\phi / N$ ——第  $i$  个用户的协议有功功率(kW)；  
 $S_{MV}$ ——通过 HV/MV 配电变压器直接以 MV 供电的负荷的总功率(在供电系统满负荷的情况下)；  
 $N$ ——所研究的 MV 配电系统假定的 MV 负荷的个数(由同一母线供电的负荷数)；  
 $U_N$ ——配电系统的标称电压(kV)。

上述对基准系统结构估算的限值可以作为估算有关不同的系统结构限值的基础,但这并不意味着谐波阻抗、总负荷和 MV 与 LV 之间的负荷分配在所考虑的系统电压级上有很大的变化。(如果所考虑系统的总负荷近似地保持不变,那么某些参数诸如  $F_{MV}$ 、 $F_{MI}$ 、具有协议功率( $S_i$ )的单个用户的个数等的变化,并不意味着新结构系统的谐波阻抗就会有大的变化。)

用下标ref表示系统参量和基准情况的发射限值,在这些条件被满足的地方,可以给出参量的发射限值,例如对 MV 系统有下列表达式:

——在只有  $S_i$  变化的特殊情况下:

$$E_{I_{hiMV}}\% = \left[ \frac{S_i}{S_{iref}} \right]^{1/\alpha} \cdot E_{I_{hiMVref}}\% \cdot \left[ \frac{S_{iref}}{S_i} \right] \quad (D4)$$

——在只有  $S_i$  和  $F_{MV}$  变化的特殊情况下:

$$E_{I_{hiMV}}\% = \left[ \frac{S_i}{S_{iref}} \cdot \frac{F_{MVref}}{F_{MV}} \right]^{1/\alpha} \cdot E_{I_{hiMVref}}\% \cdot \left[ \frac{S_{iref}}{S_i} \right] \quad (D5)$$

## D5 HV 系统

在 7.2 中对 HV 系统给出的另一种估算法在于按以下列出的步骤把附录 E 中提出的方法应用到网格状的 HV 或 EHV 统中。

——估算 HV 系统的总发射目标值

HV 总发射目标值可按以下给出的方法估算,在合理假设的基础上(某欧洲国家的电力系统的经验支持这些假设),在 HV 峰荷时间内,HV 兼容水平或 HV 规划水平是按 80% 的 HV 畸变负荷和 20% 的 MV/LV 负荷来确定的,(如发生怀疑,MV/LV 负荷对 HV/EHV 系统的影响可以通过传统的模拟进行计算而不考虑 HV/EHV 畸变负荷的注入):

$$G_{hiMV} = 0.8 \cdot L_{hiHV}(\%) \quad (D6)$$

式中： $G_{hiMV}$ ——直接以 HV 供电的所有负荷的发射第  $h$  次总谐波电压(%)；

$L_{hiHV}$ ——HV 系统的第  $h$  次谐波电压的规划水平(%)。

——确定系统满负荷时直接以 HV 供电的负荷分布;对于 HV 网格状系统,这通常意味着要对某些负荷条件进行分析。

——假定注入的谐波电流分布的类型。对 HV 网格状系统建议要用恒谐波电流注入的准则(显然,

在计算系统响应时,必须预见到只有在直接以 HV 供电的负荷的地方才有注入,并且基准注入组的每个元素必须与预测的负荷功率成正比)。

当对高额定值的畸变负荷和/或网络特性产生怀疑时,建议具体地进行传统的详细研究,也即模拟 MV 和 LV 负荷的等效注入。

在任何情况下,以谐波电压( $E_{U_{hi}}=E_{U_{hi}} \cdot Z_{hi}$ )表示的发射限值应位于下列的范围之内:

——最小值: $E_{U_{hiHV}}=0.1\%$ (基本的发射水平);

——最大值: $E_{U_{hiHV}}=G_{hiMV}$ 。

附录 E

(提示的附录)

应用推荐的方法评估发射限值的例子

与本例有关的更详细的资料请参考附录 H[11]。

E1 参考网络和假设

为了能方便地应用本标准所推荐的各种方法评估第 2 级谐波发射的限值,本附录给出了一个有关 MV 负荷谐波发射计算的例子。

考虑一个简单的参考网络,并为简化计算作了一些假设,以便能通过手算来检验推荐方法的应用情况。

图 E1 所示为一个要进行分析的 20 kV 配电网络。该系统由 6 条长度为 25 km 的 20 kV 架空线路和一台 40 MVA 的 HV/MV 供电变压器组成。在系统满载的情况下,考虑了 HV/MV 变压器的过载能力和最大利用率,供电的负荷总功率为 44 MVA ( $S_i=40 \times 1.3 \times 0.85=44$ )。

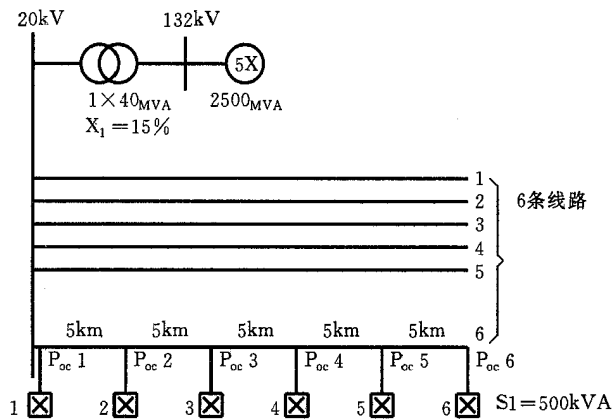


图 E1 6 条供电线路,6 个负荷/馈电线路的 MV 配电参考网络

$$S_i=40 \times 1.3 \times 0.9 \times 0.4 / (6 \times 6) = 500 \text{ kVA}$$

主供电线路:长度 25 km(在基波频率下:0.35 Ω/km)

MV 负荷与 LV 负荷之间的分配是任意的,假设 MV 负荷占 40%,LV 负荷占 60%。则以 MV 供电的功率为 18 MVA ( $S_{MV}=44 \times 0.4=18$ ),以 LV 供电的功率为 26 MVA ( $S_{LV}=44 \times 0.6=26$ )。

为了得出有代表性的结果,假设把 6 个相等的 MV 负荷沿供电线路均匀地分布,如图 E1 所示。因此,功率  $S_{MV}$  被分成 36 个具有相同功率的负荷,即  $S_i=500 \text{ kVA}$ 。

根据配电系统(意大利)的典型值,假设了其他的网络参数;在 7.2 中给出了确定这些参数的方法:

$$F_{ML} = 0.5, F_{MV} = 0.4 \text{ 和 } T_{iHM} = 1。$$

为了把手算工作量减至最少,还采用了下列的假定:

- 只计算关于 5 次谐波的发射限值；
- 不考虑沿供电线路的并联阻抗(相—大地)；
- 只表示谐波阻抗的无功部分。它的值从短路阻抗推导出来,并假定随频率线性增加(没有谐振时)。在表 E1 中给出了根据图 E1 所示参数计算的 5 次谐波阻抗的值。

表 E1 在 PCC 节点 C 处的 5 次谐波阻抗

PCC 节点号	距 P.S 的距离, km	5 次谐波阻抗 $Z_h(h=5), \Omega$
1	0	8.55
2	5	17.3
3	10	26.0
4	15	34.8
5	20	43.5
6	25	52.3

下面将根据本标准提出的三种不同的方法计算发射限值：

- 7.2.2.1 和 7.2.2.2 中的第一种近似估算法；
- 7.2.2.1 和 7.2.2.2 中的第二种近似估算法；
- 7.2.2.2 和附录 D 中的第三种近似估算法。

### E2 第一种近似的估算法

先按式(13)和式(18)计算谐波电压发射限值,然后应用式(21)转换成谐波电流发射限值。

直接从表 8 可得到能被接受的总的第 5 次谐波电压：

$$G_{AMV+LV} = 4\%$$

根据表 5,当  $h=5$  时  $\alpha=1.4$ 。用式(18)计算连接到 MV 系统的各负荷( $S_i=500$  kVA)的谐波限值：

$$E_{U_{hi}} = 4\% \sqrt[1.4]{\frac{500}{44\,000}} = 0.163\% \quad (\text{E1})$$

通过把电压除以在用户的 PCC 节点处的谐波阻抗,即式(21),就可以把容许的谐波电压发射限值转换成谐波电流发射限值。在以下给出的公式中,谐波电流发射限值是以前负荷电流的百分数来表示,此负荷电流与连接在谐波阻抗为  $Z_h$  的 PCC 处的用户协议功率  $S_i$  以及 MV 系统的标称电压  $U_N$  有关。

$$E_{I_{hi}}\% = \left[ \frac{E_{U_{hi}}\% \cdot 1\,000 \cdot U_N^2}{Z_h \cdot S_i} \right] \quad (\text{E2})$$

对于连接到节点 1 的负荷,  $Z_h=8.55 \Omega$ , 因此

$$E_{I_{hi}}\% = \left[ \frac{0.163\% \times 1\,000 \times 20^2}{8.55 \times 500} \right] = 15.2\% \quad (\text{E3})$$

类似地,对于连接到节点 6 的负荷,  $Z_h=52.3 \Omega$

$$E_{I_{hi}}\% = \left[ \frac{0.163\% \times 1\,000 \times 20^2}{52.3 \times 500} \right] = 2.5\% \quad (\text{E4})$$

表 2 给出了对沿供电线路连接的其他节点的负荷计算的结果。

### E3 第二种近似估算法

对于第二种近似估算法,从式(14)得出可接受的直接以 MV 供电的 MV 负荷的总的谐波发射：

$$G_{AMV} = \sqrt{\frac{S_{MV}}{S_{MV} + S_{LV} \cdot F_{ML}} [L_{hMV}^{\alpha} - (T_{hHM} \cdot L_{hHV})^{\alpha}]} \quad (\text{E5})$$

表 E2 按第一种近似估算法计算的 5 次谐波电流发射限值  
(隐含着假定  $F_{MV}=1$ )

PCC 节点号	距 P.S 的距离, km	$E_{Thi} \%^{1)}$
1	0	15.2
2	5	7.55
3	10	5.0
4	15	3.75
5	20	3.0
6	25	2.5

1) 协议功率  $S_i=500$  kVA 的用户负荷电流的百分数。

利用  $L_{kHV}=2\%$  和  $L_{kMV}=5\%$  (根据表 2), 代入在 E1 中给出的一些值, 可得到:

$$G_{kMV} = \sqrt{\frac{18}{18 + 26 \cdot 0.5} [5^{1.4} - (1.2)^{1.4}]} = 2.7\% \quad (E6)$$

应用式(18)对应 MV 负荷的发射限值进行计算:

$$E_{U_{kMV}} = G_{kMV} \sqrt{\frac{S_i}{S_{MV} \cdot F_{MV}}} \quad (E7)$$

$$E_{U_{kMV}} = 2.7\% \sqrt{\frac{500}{18\,000 \cdot F_{MV}}} \quad (E8)$$

当  $F_{MV}$  的值分别等于 1.0 和 0.4 时, 可得到:

——对于  $F_{MV}=1.0 \Rightarrow E_{U_{kMV}}=0.2\%$

——对于  $F_{MV}=0.4 \Rightarrow E_{U_{kMV}}=0.4\%$

利用如 E2 中同样的公式, 即式(21), 可以把以上的谐波电压发射限值转换成以第  $i$  个用户协议电流的百分数表示的谐波电流发射限值。例如, 对连接在节点 6 的负荷,  $Z_k=52.3 \Omega$ , 因此:

对于  $F_{MV}=1.0$ :

$$E_{Thi} \% = \frac{0.2\% \times 1\,000 \times 20^2}{52.3 \times 500} = 3.0\% \quad (E9)$$

对于  $F_{MV}=0.4$ :

$$E_{Thi} \% = \frac{0.4\% \times 1\,000 \times 20^2}{52.3 \times 500} = 6.1\% \quad (E10)$$

表 E3 给出了对沿供电线路连接的其他节点的负荷计算的结果。

表 E3 按第二种近似估算法计算的 5 次谐波电流发射限值

PCC 节点	距 P.S 的距离 km	$E_{ThMV}$ , 当 $F_{MV}=1$ 时 % <sup>1)</sup>	$E_{ThMV}$ , 当 $F_{MV}=0.4$ 时 % <sup>1)</sup>
1	0	18.7	37.4
2	5	9.25	17.5
3	10	6.15	12.3
4	15	4.6	9.2
5	20	3.7	7.35
6	25	3.0	6.1

1) 协议功率  $S_i=500$  kVA 的用户负荷电流的百分数。

**E4 第三种近似估算法**

这是在 7.2.2.2 中介绍过并在附录 D 中叙述的一种方法,其目的在于考虑这样一种情况:当负荷沿供电线路分散接入时,应用前面所述的那些方法可能导致对于那些连接到线路远端(这些地方的短路水平比变电站母线处要显著地低)的用户的谐波电流限值规定得过于严格。

按与 E3 中详述的第二种近似估算法相同的方式进行计算可接受的直接以 MV 供电的 MV 负荷总谐波发射。

发射限值的评估按附录 D 所述的步骤进行。

**E4.1 确定沿供电线路的谐波电流注入类型**

在本例中根据 D2 考虑了三种谐波电流注入方式:

a) 恒定谐波电流注入: $I_k=1$  A(对沿供电线路的所有 PCC 节点是恒定的)

b) 恒定谐波功率注入: $I_k=1/\sqrt{K_z}$ ,例如,对于 PCC 节点 6 有: $I_k=1/\sqrt{6.12}=0.404$  A(均方根值)。在表 E4 的第 4 列给出了所有的注入  $I_{ki}$  的计算值:

c) 与 PCC 阻抗成反比的谐波电流注入: $I_k=1/K_z$ ;例如,对于 PCC 节点 6 有: $I_k=1/6.12=0.163$  A(均方根值)。在表 E4 的第 5 列给出了所有  $I_{ki}$  的计算值。

表 E4 5 次谐波电流注入类型

PCC 节点号	$K_z^{1)}$	谐波电流 $I_{5k}$ 注入的类型		
		a 类	b 类	c 类
1	1	1	1	1
2	2.02	1	0.703	0.494
3	3.05	1	0.575	0.328
4	4.07	1	0.496	0.246
5	5.09	1	0.443	0.196
6	6.12	1	0.401	0.163

1)  $K_z=Z_{1PCC}/Z_{1BB}$ 。对于本例所考虑的系统,在 PCC 节点 1, $Z_{1BB}=Z_1$ 。

**E4.2 估算系统的谐波电压响应**

一种估算系统的谐波电压响应的可行方法由以下三个步骤组成:

——计算组成一个谐波电流注入组的各谐波电流源在 PCC 节点处形成的谐波电压;

——应用本标准 6.2 中给出的求和法则推导每个源各自对某节点的作用;

——记录在要求最严格的 PCC 节点处出现的最大谐波电压,并把它记为  $D_{U_k}$ ,在下一步计算发射限值时要用到这个值。

为了说明这种方法的应用,可利用对应于恒定谐波功率注入(b 类)的方式,计算由于位于节点 3 的负荷的谐波电流注入对 PCC 节点 6 处谐波电压的影响。

$I_{53}=0.575$  A(见表 E4)

在 PCC 节点 3 处, $Z_3=26$   $\Omega$ (见表 E1)

$U_6\%=(0.575 \times 26)/(20\ 000/\sqrt{3}) \times 100\%=0.129\%$

因为最初假定沿供电线路没有并联阻抗接入,所以,在同一供电线路上的节点 3,4,5 和 6 处这个负荷对谐波电压的作用是相同的。对于节点 1 和节点 2,谐波电压与这些节点处的谐波阻抗成正比例地减小。

用相同的方法,可以计算每个节点处所有其他负荷的作用。在表 E5 中给出了计算结果。

表 E5 系统对参考注入组的 5 次谐波电压的影响恒定谐波功率注入 %

PCC 节点号	注入的 5 次谐波电流	负荷注入的 5 次谐波电压的作用 ( $U_5/\sqrt{3}$ 的百分数)							在 PCC 处总的 $U_5^{(D)}$
		另外 5 条线路	负荷 1	负荷 2	负荷 3	负荷 4	负荷 5	负荷 6	
1	1.000	0.518	0.074	0.052	0.042	0.037	0.033	0.030	0.590
2	0.703	0.518	0.074	0.105	0.086	0.074	0.066	0.061	0.067
3	0.573	0.518	0.074	0.105	0.129	0.112	0.100	0.091	0.731
4	0.495	0.518	0.074	0.105	0.129	0.149	0.134	0.122	0.780
5	0.443	0.518	0.074	0.105	0.129	0.149	0.167	0.152	0.812
6	0.404	0.518	0.074	0.105	0.129	0.149	0.167	0.183	0.828

1) 参考的谐波注入组的总作用计算如下:例如,计算在 PCC 节点 6 处总的 5 次谐波电压(上表中最后一列)是由其他各负荷的谐波电压作用的结果,并且它是利用 6.2 中建议的求和法则根据表中最后一行所示出的:  
 $D_{U_5PCC6} = (0.518^{1.4} + 0.074^{1.4} + 0.105^{1.4} + \dots)^{1/1.4} = 0.828\%$ 。

在 PCC 节点 6 处出现的最大骚扰水平代表了本例中所考虑系统的合成 5 次谐波响应,而且如前所述,应该记录它作为计算发射限值之用。它被指定为  $D_{U_5} = 0.828\%$ 。

**E4.3** 对  $S_i = 500 \text{ kVA}$  的谐波电流发射限值的计算

谐波电流发射限值可以利用式(D2)和式(D3)对 b 类的恒定谐波功率注入的情况计算如下:

$$E_{I_{hMV}} = \frac{G_{hMV}}{D_{U_5} \cdot \sqrt{K_Z} \sqrt[1.4]{F_{MV}}} \quad (E11)$$

及

$$E_{I_{hMV}} \% = 100 \frac{E_{I_{hMV}}}{S_i / (\sqrt{3} U_N)} \quad (E12)$$

例如,对接入到节点 6 的负荷的谐波电流发射限值的计算如下:重新引入  $G_{hMV} = 2.7\%$ ,  $D_{U_5} = 0.828$ , 以及表 E4 中的  $K_Z = 6.12$ , 因此,

对于  $F_{MV} = 1.0$

$$E_{I_{hMV}} = \frac{2.7\%}{0.828\% \times \sqrt{6.12} \times \sqrt[1.4]{1}} = 1.32(\text{A, r. m. s.}) \quad (E13)$$

及

$$E_{I_{hMV}} \% = \frac{1.332}{500 / (\sqrt{3} \cdot 20)} = 9.15\% \quad (E14)$$

对于  $F_{MV} = 0.4$

$$E_{I_{hMV}} = \frac{2.7\%}{0.828\% \times \sqrt{6.12} \times \sqrt[1.4]{0.4}} = 2.53(\text{A, r. m. s.}) \quad (E15)$$

及

$$E_{I_{hMV}} \% = \frac{2.53}{500 / (\sqrt{3} \cdot 20)} = 17.6\% \quad (E16)$$

按如上同样方法计算的其他节点的发射限值列于表 E6 中。

表 E6 按第三种近似估算法对 b 类谐波注入计算的 5 次谐波电流发射限值 (恒定谐波功率注入)

PCC 节点	距 P.S 的距离 km	$E_{I_{hMV}}$ , 当 $F_{MV} = 1$ 时 % <sup>1)</sup>	$E_{I_{hMV}}$ , 当 $F_{MV} = 0.4$ 时 % <sup>1)</sup>
1	0	22.6	43.5
2	5	15.9	30.6
3	10	12.9	24.9

表 E6 (完)

PCC 节点	距 P.S 的距离 km	$E_{\text{hMV}}$ , 当 $F_{\text{MV}}=1$ 时 % <sup>1)</sup>	$E_{\text{hMV}}$ , 当 $F_{\text{MV}}=0.4$ 时 % <sup>1)</sup>
4	15	11.2	21.5
5	20	10.0	19.3
6	25	9.15	17.6

1) 协议功率  $S_i=500 \text{ kVA}$  的用户负荷电流的百分数。

采用上述相同的计算法可以计算其他类型的谐波注入方式下的发射限值: 恒定谐波电流注入 a 类, ( $K_{Zk}=1$ ), 与 PCC 处谐波阻抗成反比的谐波电流注入 c 类, 在上面的式子中用  $K_{Zk}$  代替  $\sqrt{K_{Zk}}$ 。

只要谐波阻抗和直接以 MV 供电的总负荷没有遇到大的变化, 也可以在以上对  $S_i=500 \text{ kVA}$  计算结果的基础上应用式 (D4) 和 (D5) 计算任意协议功率时的谐波发射限值。

**E5 主要评估结果的总结**

对本例所得到的结果进行了汇总, 以便对评估谐波发射限值的三种不同方法加以比较, 见表 E7。

表 E7 本例中用三种不同方法得到的结果汇总

谐波发射限值的评估方法		5 次谐波电流发射限值 $E_{\text{hMV}}$ % <sup>1)</sup>			
		$F_{\text{MT}}=1.00$		$F_{\text{MT}}=0.4$	
沿供电线路的位置		节点 1	节点 6	节点 1	节点 6
第一种近似估算法		15.2	2.5	—	—
第二种近似估算法		18.7	3.0	37.4	6.1
第三种近似估算法	a) 恒定谐波电流注入	12.4	12.4	23.9	23.9
	b) 恒定谐波功率注入	22.6	9.15	43.5	17.6
	c) 与 $Z_k$ 成反比的谐波电流注入	35.7	5.8	68.7	11.2

1) 协议功率  $S_i=500 \text{ kVA}$  的用户负荷电流的百分数。

对于简化的第一种近似估算法, 假定所有的 LV 和 MV 负荷是同时发生畸变的 (这意味着假设  $F_{\text{ML}}$  和  $F_{\text{MV}}$  都等于 1.0)。因此, 容许的发射限值一般是较低的, 而且系统的谐波吸收能力可能没有被充分利用。

对于第二种近似估算法, 假定 LV 和 MV 负荷可能不是同时发生畸变的 (在这种情况下  $F_{\text{ML}}=0.5$ )。因此, 对于 MV 负荷 ( $S_i=500 \text{ kVA}$ ) 的谐波电流发射限值稍微要高些 (在节点 1,  $E_{\text{hMV}}=18.7\%$ , 而不是  $15.2\%$ )。而且还可以考虑 MV 负荷不同时发生畸变, 这就允许在  $F_{\text{MV}}=0.4$  时发射限值增加 1.92 倍。就最严重的谐波通常是 5 次谐波来说, 为了避免进行综合的滤波, MV 畸变负荷的同时率  $F_{\text{MV}}$  是一个要考虑的重要因素。

第三种近似估算法则更进一步考虑了由电压畸变率  $D_{\text{Uk}}$  综合组成的用于计算发射水平的系统的实际响应。这就允许对这样一种情况进行调整, 即只要沿供电线路接入的负荷达到与允许的骚扰水平一致, 就可以允许有较多的发射。在使用本方法时, 谐波注入类型的选择是非常重要的, 在 D2 中说明了这一点。对于恒定谐波功率注入情况下的允许发射限值表示了充分利用系统吸收谐波的能力与不致过分严格地评估发射限值之间进行的一种折衷选择。

附录 F  
(提示的附录)

某些典型的 HV 情况的例子[12]

F1 Konti-Skan 第 2 回 HVDC 线路

图 1 为连接到交流网络的 Konti-Skan 第 2 回 HVDC 线路的单线图。在节点 1 处的故障水平是 3 700 MVA。之所以对这种情况特别感兴趣,是因为现有的一个 HVDC 站距被考虑的另一个 HVDC 站不是很远,从而提供了一个应用式(24')的例子。

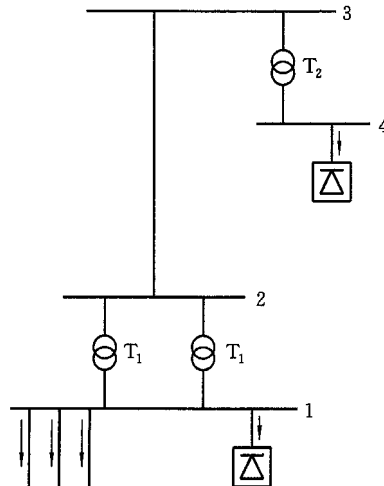


图 F1 连接到交流网络的 Konti-Skan HVDC 接线图

原技术要求中的限值(在委托书中):

$$U_h \leq 1\%$$

$THD \leq 1.5\%$ (在节点 1 处的谐波电压,包括背景畸变电压)。

按照推荐指南的限值:

$S_i = 300 \text{ MVA}$ (新的 Konti-Skan 第 2 回 HVDC 线路的功率);

$\sum S_{out} = 500 \text{ MVA}$ (在节点 1 处测量);

$S_{t1} = 300 + 500 = 800 \text{ MVA}$ ;  $S_{t4} = 275 \text{ MVA}$ (原先的 Konti-Skan 第 1 回 HVDC 线路的功率);

$K_{h+1} = 0.15$ (计算机计算给出的值在 0.1~0.2 之间,与谐波次数有关。这里将对所有的谐波都采用 0.15)。

因此,由式(24')和(26)得:

$$S_t = 800 + (0.15 \times 275) = 841 \text{ MVA},$$

$$E_{U_{hi}} = L_{HVV} \sqrt{\frac{S_i}{S_t}} \quad (\text{见表 F1}).$$

新技术要求与测量结果的比较:

表 F1 Konti-Skan 第 2 回线路的技术要求和测量结果

$h$	$L_h$ %	技术要求 $E_{U_{hi}}$ %	测量结果 $U_h$ %
2	1.5	0.54	—
3	2.0	0.71	0.60

表 F1 (完)

$h$	$L_h$ %	技术要求 $E_{U_{hi}}$ %	测量结果 $U_h$ %
4	1.0	0.36	—
5	2.0	0.71	0.70
6	0.5	0.18	—
7	2.0	0.71	0.30
8	0.2	—	—
9	1.0	0.48	—
10	0.2	—	—
11	1.5	0.72	0.60
13	1.5	0.72	0.30
15	0.3	0.18	—
17	1.0	0.60	0.15
19	1.0	0.60	0.10
23	0.7	0.42	0.35
25	0.7	0.42	0.15
29	0.6	—	—
31	0.56	—	—
35	0.5	0.29	0.20
37	0.47	0.28	0.10
47	0.37	0.22	0.15
49	0.36	0.22	—
<i>THD</i>	3.0	1.8	1.3

$h$  是谐波次数;  
 $L_h$  是规划水平(见表 2);  
 $E_{U_{hi}}$  是发射限值;  
 $U_{h\text{meas}}$  是对所考虑的产生谐波的设备测量的谐波电压。  
 注: Konti-Skan 第 2 回线路的测量值是根据 64 个周期的平均值。

测量结果表明:基本上满足新的技术要求(第 2 级限值)。同时也表明了新的技术要求比旧的更好地符合实际的物理现象(谐波电压的幅值随着频率的增加而减小)。

**F2 钢铁厂**

图 2 为一个连接到交流电网的钢铁厂的接线图。在节点 1 处的短路容量是 5 000 MVA。

根据指南推荐的限值:

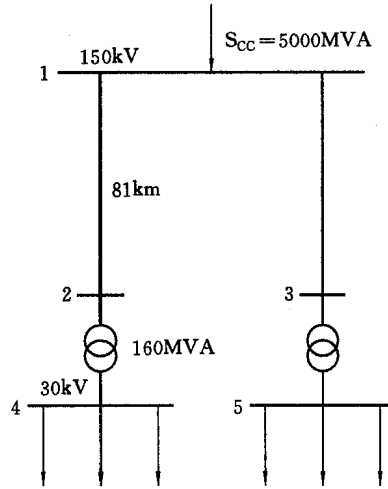
$$S_i = 150 \text{ MVA (钢铁厂的功率)}$$

$$\sum S_{\text{out}} = 600 \text{ MVA (在节点 1 处测量)}$$

$$S_t = 600 \text{ MVA}$$

$$E_{U_{hi}} = L_{\text{AHV}} \sqrt{\frac{S_i}{S_t}} \quad (\text{见表 F2}).$$

这是一个很有趣的例子,因为在这个 150 kV 公用供电系统中,某些次数的谐波( $h=23、25、35$  和  $37$ )超过了第 2 级发射限值,当  $h=23$  时甚至超过了规划水平!然而,只要不发生问题,供电公司就接受这种状态维持不变。这表明了这种灵活方法的重要性,超过第 2 级发射限值甚至规划水平的情况可以按第 3 级程序接受。因此,省去了支付滤波器的费用。



(电压为 30 kV 的节点 4 和节点 5 都属于钢铁厂)

图 F2 连接到交流网络的钢铁厂

新技术要求与测量结果的比较:

表 F2 钢铁厂的技术要求和测量结果

$h$	$L_h$ %	技术要求 $E_{U_h}$ %	测量结果 $U_h$ %
2	1.5	0.38	—
3	2.0	0.50	0.43
4	1.0	0.25	—
5	2.0	0.50	0.49
6	0.5	0.13	—
7	2.0	0.50	0.35
8	0.2	0.07	—
9	1.0	0.37	0.07
10	0.2	0.07	—
11	1.5	0.56	0.44
13	1.5	0.56	0.48
15	0.3	0.15	0.11
17	1.0	0.50	0.37
19	1.0	0.50	0.45
23	0.7	0.35	1.15
25	0.7	0.35	0.50
29	0.6	0.30	0.16
31	0.56	0.28	0.22

表 F2 (完)

$h$	$L_h$ %	技术要求 $E_{U_{h,i}}$ %	测量结果 $U_h$ %
35	0.5	0.25	0.33
37	0.47	0.24	0.31
47	0.37	0.19	—
49	0.36	0.18	—
$THD$	3.0	1.50	1.78

注：在钢铁厂的测量值是每天的概率为 95% 的值；测量时间持续一星期并保留每天各次谐波的最大值。

## 附录 G

(提示的附录)

## 主要字母符号、下标和符号表

## 主要字母符号

$\alpha$	求和法则中用的指数
$C$	兼容水平
$E$	发射限值
$F$	负荷同时率
$h$	谐波次数
$i$	第 $i$ 个用户或负荷
$I$	电流
$j$	第 $i$ 个用户的设备内的第 $j$ 个装置
$K$	系数或两个值(一般意义)之间的比
$L$	规划水平
$N$	所考虑的配电系统的负荷的数量
$PCC$	公共耦合点
$P$	有功功率
$S$	视在功率
$T$	传递系数
$U$	电压
$Z$	阻抗

## 下标表

1BB	母线处的基波(阻抗)
1PCC $i$	第 $i$ 个用户的 PCC 处的基波(阻抗)
FHM	HV/MV 闪烁(传递)
FML	MV/LV 闪烁(传递)
$h$	谐波次数
$hHM$	HV/MV 第 $h$ 次谐波电压(传递)
$hLM$	LV/MV 第 $h$ 次谐波电压(传递)
$hML$	MV/LV 第 $h$ 次谐波电压(传递)

$i$	第 $i$ 个用户或负荷
$I_{hiMV}$	<b>MV</b> 系统第 $i$ 个用户的 $h$ 次谐波电流(A, r. m. s)
$I_{hiMV}\%$	<b>MV</b> 系统第 $i$ 个用户的 $h$ 次谐波电流(协议电流的百分数)
$j$	第 $j$ 个装置
<b>LM</b>	在 <b>LV</b> 和 <b>MV</b> 负荷之间
<b>LV</b>	<b>LV</b> 负荷
<b>ML</b>	在 <b>MV</b> 和 <b>LV</b> 负荷之间
<b>MV</b>	<b>MV</b> 负荷
<b>N</b>	标称的
<b>scBB</b>	在母线处三相短路
<b>scPCC<math>i</math></b>	在第 $i$ 个用户的 <b>PCC</b> 处三相短路

## 主要符号表

(显明的符号没有引入)

$C_{PstLV}$	<b>LV</b> 的短时闪烁兼容水平
$C_{U_{hLV}}$	<b>LV</b> 的 $h$ 次谐波电压兼容水平
$D_{U_{h}}$	谐波电压响应(由于一组基准电流的注入自然,在所考虑的系统等级内某处出现的最大 $h$ 次谐波电压)(%)
$E_{I_{hiMV}}$	以 <b>MV</b> 直接供电的第 $i$ 个用户的 $h$ 次谐波电流的容许发射限值(A, r. m. s)
$E_{I_{hiMV}\%}$	直接以 <b>MV</b> 供电的第 $i$ 个用户 $h$ 次谐波电流容许的发射限值(协议电流的百分数)
$E_{PstMV}$	直接以 <b>MV</b> 供电的第 $i$ 个用户短时闪烁容许的发射限值(p. u)
$E_{U_{hLV}}$	直接以 <b>LV</b> 供电的第 $i$ 个负荷 $h$ 次谐波电压容许的发射限值(%)
$E_{U_{hMV}}$	直接以 <b>MV</b> 供电的第 $i$ 个负荷 $h$ 次谐波电压容许的发射限值(%)
$F_{ML}$	<b>MV</b> 和 <b>LV</b> 配电系统总畸变负荷中的同时率
$F_{MV}$	<b>MV</b> 负荷同时发生畸变的同时率,其值取决于负荷和系统的特性(平均值=0.4)
$G_{PstMV}$	所有直接以 <b>MV</b> 供电的负荷总的短时闪烁发射(p. u)
$G_{hHV}$	所有直接以 <b>HV</b> 供电的负荷总的 $h$ 次谐波电压发射限值(%)
$G_{hMV}$	所有直接以 <b>MV</b> 供电的负荷总的 $h$ 次谐波电压发射限值(%)
$I_{scBB}$	母线处的三相短路电流
$I_{scPCCi}$	沿供电线路的第 $i$ 户的 <b>PCC</b> 处的三相短路电流
$K_Z$	$Z_{IPCCi}/Z_{1BB}$ 或 $I_{scBB}/I_{scPCCi}$ (按附录 D 中 D2 的定义)
$L_{PstHV}$	<b>HV</b> 的短时闪烁规划水平
$L_{PstMV}$	<b>MV</b> 的短时闪烁规划水平
$L_{U_{hHV}}$	<b>HV</b> 的 $h$ 次谐波电压规划水平
$L_{U_{hMV}}$	<b>MV</b> 的 $h$ 次谐波电压规划水平
$N$	假定被考虑的 <b>MV</b> 配电系统 <b>MV</b> 负荷的数量(由同一母线供电的负荷数)
<b>PCC</b> 或 <b>PCC<math>i</math></b>	第 $i$ 个用户的公共耦合点
$P_i$	第 $i$ 个用户的协议有功功率
$P_{stHV}$	<b>HV</b> 的短时闪烁
$P_{stMV}$	<b>MV</b> 的第 $i$ 个用户的短时闪烁
$P_{stMV}$	<b>MV</b> 的短时闪烁
$Q_C$	容性无功功率

$S_{Dwi}$	第 $i$ 个用户的加权畸变功率
$S_i$	第 $i$ 个用户的协议视在功率 ( $P/\cos\phi$ ) (kVA) (对大型的畸变负荷用功率因数代替 $\cos\phi$ )
$S_{LV}$	通过 HV/MV 配电变压器直接以 LV 供电的负荷总功率 (在供电系统满载时), 以 HV/MV 变压器额定容量为 1p.u 值表示时, 平均值=0.6
$S_{MV}$	通过 HV/MV 配电变压器直接以 MV 供电的负荷总功率 (在供电系统满载时), 以 HV/MV 变压器额定容量为 1p.u 值表示时, 平均值=0.4
$S_{sc}$	短路功率
$T_{FHM}$	HV/MV 闪烁传递系数, 其值取决于负荷和系统特性 (平均值=0.8) <sup>[1]</sup>
$T_{FML}$	MV/LV 闪烁传递系数, 其值取决于负荷和系统特性 (平均值=0.8) <sup>[1]</sup>
$T_{hFM}$	HV/MV $h$ 次谐波电压传递系数, 其值取决于负荷和系统特性, 负荷级别和谐波次数 (平均值=1)
$T_{hML}$	MV/LV $h$ 次谐波电压传递系数, 其值取决于负荷和系统特性, 负荷级别和谐波次数 (平均值=0.95)
$U_h$	$h$ 次 (谐波次数通用代号) 谐波电压
$U_{hHV}$	HV $h$ 次谐波电压
$U_{hMV}$	MV $h$ 次谐波电压
$U_{hiMV}$	第 $i$ 个 MV 用户 $h$ 次谐波电压
$U_N$	配电系统标称电压
$Z_{1BB}$	母线处基波阻抗
$Z_{1PCCi}$	沿供电线路第 $i$ 个用户的 PCC 处的基波阻抗 ( $\Omega$ )
$Z_h$	第 $i$ 个用户在 PCC 处提供配电系统的 $h$ 次谐波阻抗 (在谐波频率下的欧姆数)
$Z_i$	第 $i$ 个用户的 PCC 处的阻抗

## 附录 H

(提示的附录)

## 参 考 资 料

- [1] IEC 1000-2-6;1995, Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 2, Environment—Assessment of the emission levels in the power supply of industrial plants as regards low-frequency conducted disturbances.
- [2] Guide for assessing the network harmonic impedance (A. Robert, T. Deflandre, WG CC02, ELECTRA, August 1996).
- [3] Flickern von Leuchtstofflampen durch Tonfrequenz-Rundsteuerimpulse (H. J. Hoffmann et al, etz Bd. 102(1981)H. 24, S. 1268~1272).
- [4] Flicker caused by interharmonics (W. Mombauer, etzArchiv Bd. 12(1990)H. 12, S. 391~396).
- [5] Grundsätze für die Beurteilung von Netzurückwirkungen (VDEW, 92).
- [6] Investigations on the impact of voltage and current harmonics on end-use devices and their protection (EF Fuchs, DOE/RA/50150-23, DE87 008018, Jan 87).
- [7] Untersuchungen von Störungen beim Betrieb einer Tonfrequenz-Rundsteueranlage infolge von Modulationseffekten (R. Kruff, Elektrizitätswirtschaft, Jg. 79(1980), H. 20, S. 755~759).
- [8] IEEE Std 776.

- 
- [9] CSA C22.3 N° 3.
- [10] Report on the harmonic impedance of supply systems (Electricity Association, Engineering Technical Report N°112,1988).
- [11] Report on EMC co-ordination in electricity supply systems (UNIPEDE, Normcomp, August 1994).
- [12] Connection of harmonic producing installations in high-voltage networks with particular reference to HVDC,Part 1:guide for limiting harmonic voltage effects(A. Robert on behalf of JTF 01 from WG CIGRE/CIRED CC02 and WG CIGRE 14. 03,ELECTRA. N°149, August 93).
- [13] Equipment producing harmonics and conditions governing their connection to the mains power supply(GT CIGRE 36. 05,ELECTRA 123,Mar 89).
- [14] Connection of distorting loads—An international study(A. Robert, J. Marquet on behalf of WG CIGRE/CIRED CC02,CIRED 91,Paper 2. 04).
- [15] IEC 1000-2-1; 1990, Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 2; Environment—Electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signalling in public power supply systems
- [16] IEC 1000-2-2; 1990, Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 2; Environment—Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems
- [17] Assessing voltage quality with relation to harmonics, flicker and unbalance (A. Robert and J. Marquet on behalf of WG CC02,CIGRE 92—Paper 36-203,CIRED Bulletin No 16-Nov 92).
- [18] Statistical approach for harmonics measurements and calculations (J. M. Crucq and A. Robert, CIRED 89,Paper 2. 02).
- [19] Harmonic currents in controlled three-phase rectifier installations (E. Wargowsky,CIRED 81, Paper 2. 7).
- [20] AC system modelling for AC filter design, An overview of impedance modeling (J. Arrillaga, CIGRE JTF 36. 05. 02/14. 03. 03,ELECTRA, March 1996)
- [21] Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public medium-voltage power supply systems(IEC 77A (Sec. )88,1994).
-