

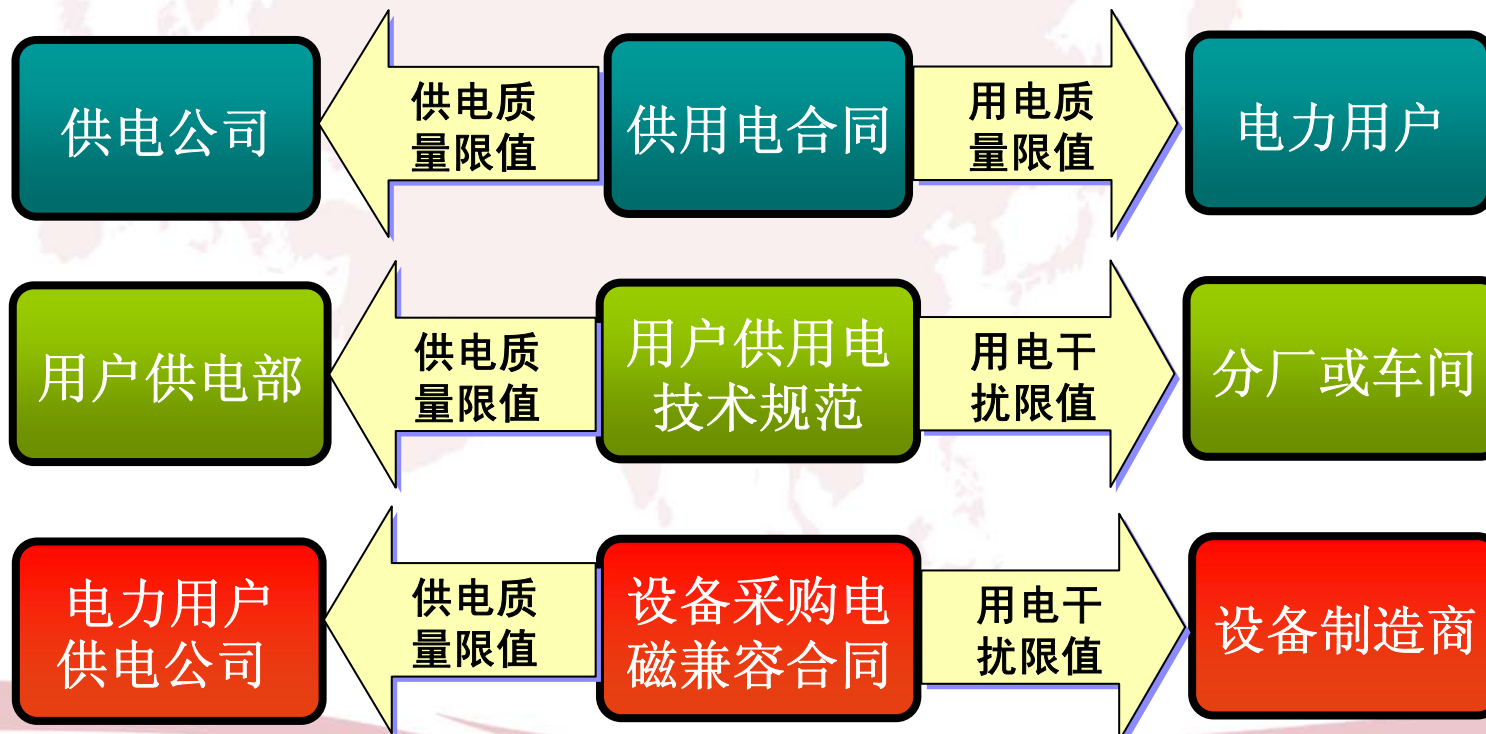
供配电系统电能质量 限值的计算

上海宝钢安大电能质量有限公司
教育部电能质量工程研究中心

李令冬

1. 为什么要计算电能质量限值

电能质量限值是在社会成本最小的前提下，平衡供电公司、电力用户和电力设备制造商三者利益的技术壁垒。



TECHNICAL REPORT

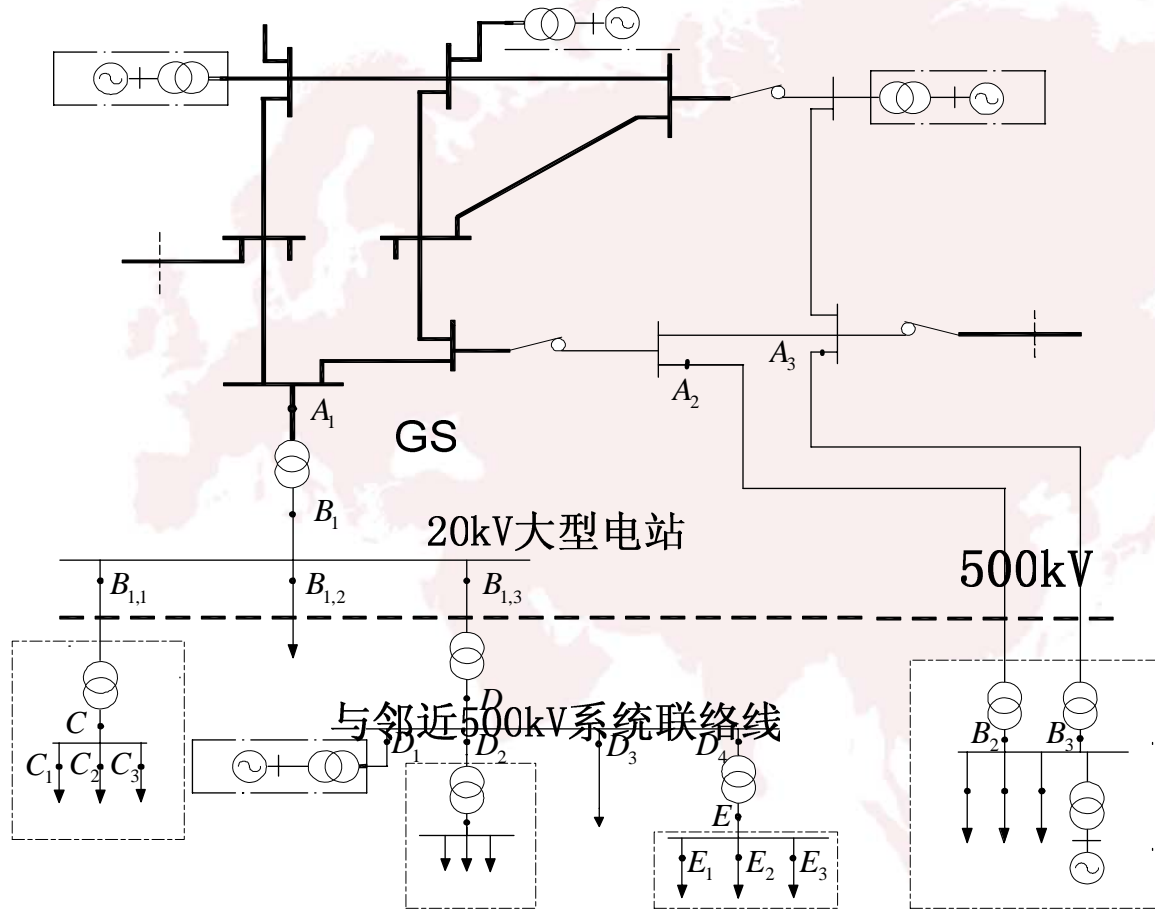
IEC/TR 62510 Edition 1.0 2008-06

Standardising the characteristics of electricity

IEC技术报告“电力特性的标准化”中指出：制定和贯彻电能质量标准的根本目的是协调网络运营商和最终用户、最终用户和设备供应商、网络运营商和设备供应商之间的关系。

协调上述各方关系的手段是限制上述各方电气接口的供电质量偏差和用电干扰，其中最重要的工作是：按照电能质量标准和相关电磁兼容标准规定计算电能质量限值。

2. 电网拓扑结构与电能质量考核点



图中

A1: 电力公司内部PQ考核点;

A2、A3: 220kV大型高压用户PQ考核点;

B1: 110kV全部用户PQ考核点;

B1,1、B1,2: 分别为110kV高压用户1和2 PQ考核点;

B1,3: 110kV大型用户PQ考核点;

B2、B3: 大型高压用户内部PQ考核点;

C、C1、C2、C3: 高压用户1内部PQ考核

输电系统

D: 全部10kV用户电能质量考核点;

D1、D2、D3: 分别为10kV小型电站、中压用户1和2PQ考核点;

E: 0.4kV全部低压用户PQ考核点;

E1、E2、E3: 分别为0.4kV低压用户1、2和3PQ考核点。

图1 电网络拓扑结构与电能质量考核点

3. 电能质量限制计算标准

3.1 电能质量标准

GB/T 14549-1993	电能质量	公用电网谐波；
GB/T 12325-2008	电能质量	供电电压偏差；
GB/T 15945-2008	电能质量	电力系统频率偏差；
GB/T 12326-2008	电能质量	电压波动和闪变；
GB/T 15543-2008	电能质量	三相电压不平衡。

3.2 电磁兼容标准

GB17625.1-2003 / IEC61000-3-2:2001 电磁兼容限值
谐波电流发射限值（设备每相输入电流 $\leq 16\text{A}$ ）；

GB/Z17625.6-2003/ IEC61000-3-4:1998 (TR) 电磁兼容限值
对额定电流大于16A的设备在低压供电系统中产生的谐波电流的限值；

GB/Z17625.4-2000 / IEC61000-3-6:1996 (TR2) 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。

3.3 电能质量标准与电磁兼容标准的适用范围及关联性

在保证中高压用户对公用电网公共连接点干扰限值在国标限值以内的前提下，配电网用户的电压质量按照电磁兼容的规划水平管理，子系统或设备对用户配电网的干扰限值按照电磁兼容的规划水平确定，电力设备对供电电压质量要求的限值按电磁兼容水平确定。

对同一电能质量指标，国标比电磁兼容的规划水平严格，电磁兼容的规划水平比电磁兼容水平严格，因此按照上述方法确定中高压用户内部配电网的电能质量和干扰限值可以最大限度地降低用户电能质量的技术和管理成本。

4. 电能质量限值计算体系

4.1 电能质量限值计算体系图

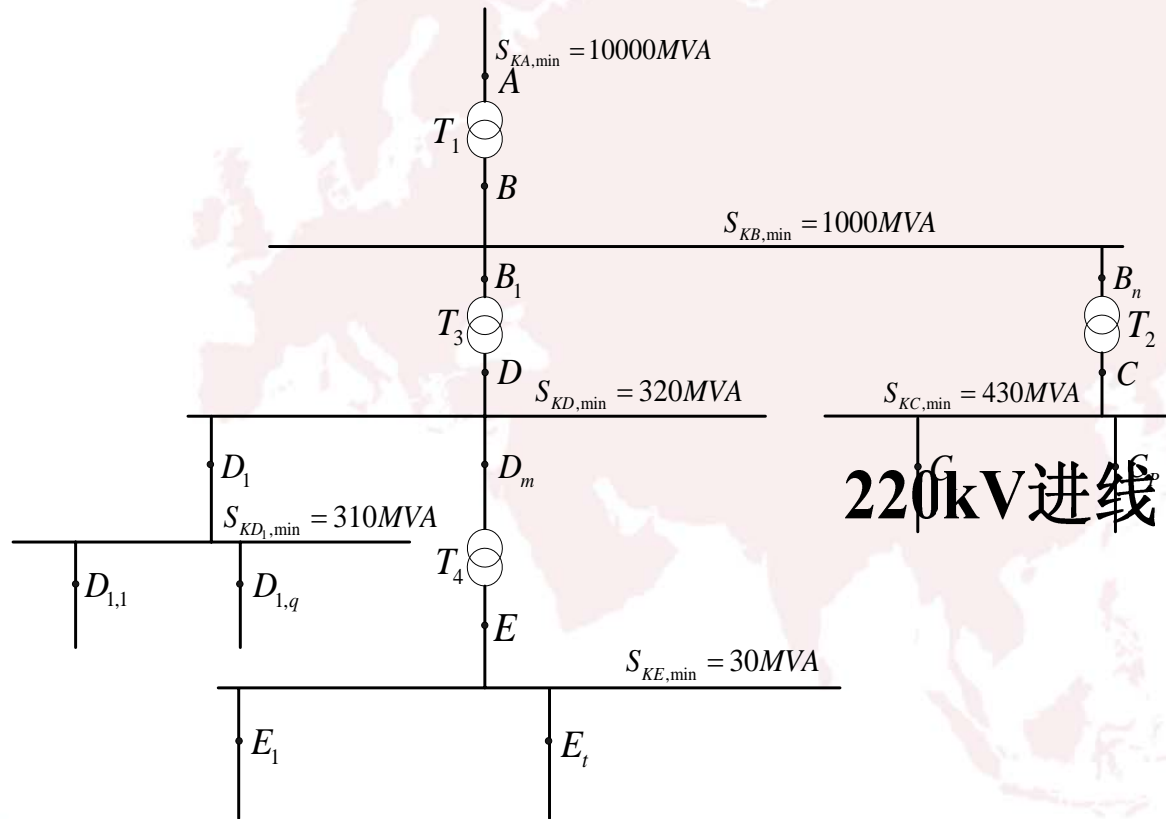


图2中

A: 电力公司内部220kV考核点;

(当 T_1 产权属于一个大用户时, 则A为电力公司与电力用户220kV双向考核点。)

B: 电力公司内部110kV考核点;

$B_1 \sim B_n$: 电力公司与各用户110kV双向考核点;

C: B_n 用户内部35kV考核点;

$C_1 \sim C_p$: B_n 用户供电部与C各子系统35kV双向考核点;

D: B_1 用户内部10kV考核点;

$D_1 \sim D_m$: B_1 用户供电部与D各子系统10kV双向考核点;

$D_{1,1} \sim D_{1,q}$: B_1 用户供电部与 D_1 子系统各高压用电设备10kV双向考核点;

E: B_1 用户供电部与 D_m 子系统低压供电内部0.4kV考核点;

$E_1 \sim E_t$: 低压供电部E与各低压电气设备0.4kV双向考核点。

图2 电能质量限值计算体系

4.2 考核点限值计算内容及引用标准

(1) 一类考核点：电力公司内部考核

- 考核对象：电力公司内部。
- 考核内容：电力公司内部供电点供电质量或供电质量与全部用户的用电质量。
- 供电质量限值内容：系统频率偏差 Δf_s ，电压偏差 e_u 、电压变动 d_u 和长时间电压闪变 P_{LT} 、三相电压不平衡度 ε_{U2} 和 ε_{U0} 谐波电压 THD_U 、 HRU_h 。
- 全部用户用电质量限值内容：有功冲击、最大无功功率、用户引起的电压变动和电压闪变、注入系统的负序电流和谐波电流。
- 引用标准：电能质量标准（见3（1））
- 主要应用：电力系统规划、供用电管理、电力调度、电网运行维护。

(2) 二类考核点：电力公司和电力用户双向考核

- 考核对象：电力公司和电力用户。
- 考核内容：电力公司供电质量和单个电力用户的用电质量。
- 供电质量限值内容：同一类考核点
- 电力用户用电质量限值内容：同一类考核点。
- 引用标准：同一类考核点。
- 主要应用：电力系统规划、供用电协议、供用电管理、电力调度、电网运行维护。

(3) 三类考核点：单个用户内部中高压供电管理考核

- 考核对象：单个用户内部供电部。
- 考核内容：用户内部中高压供电质量。
- 供电质量限值内容：同一类考核点。
- 引用标准：谐波电压引用电磁兼容标准GB/Z 1765.4-2000，其他同一类考核点或在不影响二类考核点考核指标和中低压配电网与设备安全运行的前提下适当放宽限值。
- 主要应用：电力系统规划、供用电管理、电力调度、电网运行维护。

(4) 四类考核点：用户中压供电管理部和高压电气设备双向考核

- 考核对象：用户供电部和高压电气设备。
- 考核内容：供电质量和用电质量。
- 供电质量限值内容：一般同三类考核点，对特殊电压敏感负荷，需增加电压暂降指标限值。
- 高压电气设备用电质量：电气设备引起的电压变动和电压闪变及注入系统的负序电流和谐波电流。
- 引用标准：谐波电压和谐波电流引用电磁兼容标准，其他同一类考核点或在不影响三类考核点考核指标和中低压配电网与设备安全运行的前提下适当放宽限值。
- 主要应用：电力系统规划、电气设备采购合同、供用电管理、电力调度、电网与电气设备运行维护。

(5) 五类考核点：用户内部低压供电管理考核点

- 考核对象：用户内部供电部。
- 考核内容：用户内部低压供电质量。
- 供电质量限值内容：同三类考核点。
- 引用标准：同三类考核点。
- 主要应用：同三类考核点。

(6) 六类考核点：用户低压供电部和低压电气设备双向考核点

- 考核对象：用户供电部和低压用电设备。
- 考核内容：供电质量和用电质量。
- 供电质量限值内容：同四类考核点。
- 低压用电设备用电质量：同四类考核点。
- 引用标准：同四类考核点。
- 主要应用：同四类考核点。

5. 计算举例

5.1 计算图2中考核点A的供电质量限值

(1) 考核点类型：一类。

(2) 供电质量限值

① 系统频率偏差限值： $\pm 0.2\text{Hz}$ 。

② 供电电压偏差：供电电压正、负偏差之和不超过系统标称电压的 10%。

③ 三相不平衡度：负序电压95%概率最大值。

④ 电压变动限值如表1所示：

表1 电压变动限值

电压变动 d_u (%)	≥ 3	≥ 2.5	≥ 1.5	≥ 1
变动频度限值 r (次/h)	$r \leq 1$	$1 < r \leq 10$	$10 < r \leq 100$	$100 < r \leq 1000$

⑤ 电压闪变限值

一周（168h）内最大值不超过0.8。

⑥ 谐波电压

GB/T 14549-1993 没有给出220kV电压等级的谐波电压限值，GB/Z 17625.4-2000给出的高压和超高压谐波电压的电磁兼容限值比GB/T 14549大。因此 THD_u 及 HRU_h （ $h \leq 25$ 次）的限值按GB/T 14549-1993中110kV限值规定给出。

变频器的应用使电网中大于25次（一般小于100次）的谐波问题十分突出。因此当 $h > 25$ 次时， HRU_h 的限值按GB/Z 17625.4-2000规定的电磁兼容规划水平给出。

由此，我们给出220kV电压等级的谐波电压限值如表2所示：

表2 220kV电压等级谐波电压限值

系统标称电压 (kV)	电压总谐波畸 变率 THD_u (%)	h 次谐波电压含有率 HRU_h (%)		
		奇次 $h \leq 25$	偶次 $h \leq 25$	$h > 25$
220	2	1.6	0.8	$0.2+0.5(25/h)$

5.2 计算图2中考核点B1的供电质量限值和用电质量限值

(1) 考核点类型：二类。

(2) 供电质量限值

除电压闪变以外，其他电能质量限值指标同5.1给出的结果。

(3) 用电质量限值

① 有功功率冲击限值

有功功率冲击：10s测量周期内最大有功功率与最小有功功率之差。

最大有功功率冲击：用户负荷功率波动最大时间内有功功率冲击的最大值（统计周期不小于30min）。

设系统发电容量为2000MW，发电机功率频率静态特征系数 $K_{Gf}=20$ ，备用容量系数 $\rho=1.2$ ，负荷频率调节效应系数 $K_{Lf}=2$ ，根据用户的协议用电容量，电力公司规定该用户引起的频率偏差为0.05HZ，则有功功率冲击最大值：

$$\Delta P_{\max} = \frac{\Delta f_{\max}}{f_N} \times S_G \times (\rho K_{Gf} + K_{Lf}) = \frac{0.05}{50} \times 2000 \times (1.2 \times 20 + 2) \text{MW} = 52 \text{MW}$$

② 最大无功功率限值

根据用户的协议用电容量，电力公司规定该用户最大无功功率引起最大电压下降不大于5%，则最大无功功率限值为

$$Q_{\max} \leq 320 \times 0.05 MVar = 16 MVar$$

③ 用户引起的电压长时间闪变限值

由110KV母线供电的全部用户在B₁点引起的电压长时间闪变限值

$$G = \sqrt[3]{1^3 - 0.8^3} \times 0.8 = 0.70$$

设用户波动负荷同时系数F=0.3。

则该用户在B₁点引起的电压闪变限值

$$E = G \sqrt[3]{\frac{S_{T_3}}{S_{T_1}} \times \frac{1}{F}} = 0.7 \times \sqrt[3]{\frac{60}{250} \times \frac{1}{0.3}} = 0.65$$

④ 用户注入电网谐波电流的限值

A. $h \leq 25$ 次谐波电流限值

电压等级110kV，基准短路容量750MVA，实际最小短路容量1000MVA，供电容量 $S_{T1}=250\text{MVA}$ ，用电协议容量 $S_{T3}=60\text{MVA}$ 。

根据GB/T 13549-1993，110kV单个用户注入点的谐波电流限值计算结果如表3所示：

表3 110kV母线用户注入点谐波电流限值计算

谐波次数 h	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
基准短路容量 750MVA 时全部用户限值 $I_{p,h}(A)$	12	9.6	6	9.6	4	6.8	3	3.2	2.4	4.3	2	3.7
实际短路容量 1000MVA 时全部用户注入 B 点限值 $I_h(A)$	16	12.8	8	12.8	5.3	9.1	4	4.3	3.2	5.7	2.7	4.9
单个用户时注入 B_1 点限值 $I_{B_1,h} = I_h \left(\frac{S_{T_3}}{S_{T_1}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} (A)$	32.6	46.8	16.3	42	10.8	25.2	8.2	8.8	6.5	12.6	5.5	10.4
谐波次数 h	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
基准短路容量 750MVA 时全部用户限值 $I_{p,h}(A)$	1.7	1.9	1.5	2.8	1.3	2.5	1.2	1.4	1.1	2.1	1	1.9
实际短路容量 1000MVA 时全部用户注入 B 点限值 $I_h(A)$	2.3	2.5	2	3.7	1.7	3.3	1.6	1.9	1.5	2.8	1.3	2.5
单个用户时注入 B_1 点限值 $I_{B_1,h} = I_h \left(\frac{S_{T_3}}{S_{T_1}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} (A)$	4.7	5.1	4.1	7.6	3.5	6.7	3.3	3.9	3.1	5.7	2.7	5.1

B. $h > 25$ 次谐波电流限值

目前还没有计算 $h > 25$ 次谐波电流限值。但是我们可以根据电磁兼容 GB/Z 17625.4-2000中谐波电压规划水平规定的大于25次谐波电压限值和系统阻抗计算110kV全部用户注入A点的谐波电流限值。

设 $h > 25$ 次背景谐波电压为，谐波电压限值为：

$$U_h = \frac{U_N}{100\sqrt{3}} \times \left[0.2 + 0.5 \left(\frac{25}{h} \right) \right]$$

全部用户负荷引起的谐波电压限值： $U_{B,h} = \sqrt{U_h^2 - U_{0,h}^2}$

系统 h 次谐波阻抗： $X_{S,h} = \frac{hU_N^2}{S_{KB,\min}}$

则全部用户注入系统谐波电流限值： $I_{B,h} = \frac{U_{B,h}}{X_{S,h}}$

$$\text{对 } h=60, U_{0,60} = 0.10kV \quad U_{60} = \frac{U_N}{100\sqrt{3}} \times \left[0.2 + 0.5 \left(\frac{25}{h} \right) \right] kV = 0.260kV$$

$$U_{B,60} = \sqrt{0.26^2 - 0.1^2} kV = 0.24kV \quad X_{S,60} = \frac{110^2 \times 60}{1000} \Omega = 726\Omega \quad I_{B,60} = \frac{240}{726} A = 0.33A$$

$I_{B,60} = 0.33A$ 是注入B点的60次谐波电流, $I_{B,60}$ 如何向B1, B2, ..., Bn 分配, 没有相关的标准引用, 仿照GB/T 14549-1993给出的方法, 则

$$I_{B_1,60} = I_{B,60} \left(\frac{S_{T_3}}{S_{T_4}} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.33 \times \left(\frac{60}{250} \right)^{\frac{1}{2}} A = 0.16A$$

⑤ 用户注入电网的负序电流限值

用户引起的负序电压限值为 $\varepsilon_{U_2} = 1.3\%$ 。 $U_2 = \frac{110}{\sqrt{3}} \times 0.013kV = 0.827kV$ 。

系统的基波负序阻抗等于系统基波正序阻抗 $X_2 = \frac{U_N^2}{S_{KB,min}} = \frac{110^2}{1000} \Omega = 12.1\Omega$,

用户注入电网的负序电流限值 $I_2 = \frac{U_2}{X_2} = \frac{827}{12.1} A = 68A$ 。

5.3 计算图2中考核点D1, 1供电质量限值和用电质量限值

(1) 考核点类型：四类。

(2) 供电质量限值

- ① 系统频率偏差限值：±0.2Hz。
- ② 供电电压偏差限值：±7%。
- ③ 三相电压不平衡度：负序电压95%概率大值。
- ④ 电压变动限值如表4所示：

表4 电压变动限值

电压变动 d_u (%)	4	3	2	1.5
变动频度限值 r (次/h)	$r \leq 1$	$1 < r \leq 10$	$10 < r \leq 100$	$100 < r \leq 1000$

⑤ 电压闪变限值

一周（168h）内最大值不超过0.8。

⑥ 谐波电压限值

A. $D_{1,1}$ 点属于用户内部电网，为了降低谐波管理与控制的成本。我们按照GB/Z17625.4-2000规定的谐波电压电磁兼容水平和规划水平指标值作为谐波电压限值。

B. 电磁兼容水平指电气设备正常运行时对供电网络电磁环境的最低要求。兼容水平一般以这个系统的95 %概率大值水平为基础。电磁兼容水平是电力用户与电气设备供应商签订采购合同的技术条件：电力用户必须保证的电磁环境。

低压与中压系统谐波电压电磁兼容水平如表5所示。

C. 规划水平是供电部门内部的质量目标，规划水平等于或低于电磁兼容水平。

中压、高压和特高压系统的谐波电压规划水平如表6所示。

⑦ 电压暂降限值：根据4MW变频电机运行技术条件，电压暂降限值为残余电压

$$\Delta U \leq 0.80 p.u. \quad \Delta t \leq 20ms$$

表5 LV和MV系统的电磁兼容水平

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	谐波电压	谐波次数	谐波电压	谐波次数	谐波电压
h	%	h	%	h	%
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%。

表6 MV、HV和EHV系统谐波电压的规划水平

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 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 × (25/h)	0.2+0.5 × (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，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。
- 2) 总谐波畸变率 (THD)：MV 网络为 6.5%，HV 网络为 3%。

(3) 用电质量限值

因 $D_{1,1}$ 点所在支路仅带4MW变频电机，有功功率冲击，无功功率波动和负序电流干扰很小，但谐波干扰较大。为了保证10kV- D_1 母线谐波电压满足电气设备的电磁兼容要求，我们按谐波电压规划水平推算各次谐波电流发射限值。

谐波电流发射限值流程如图3所示：

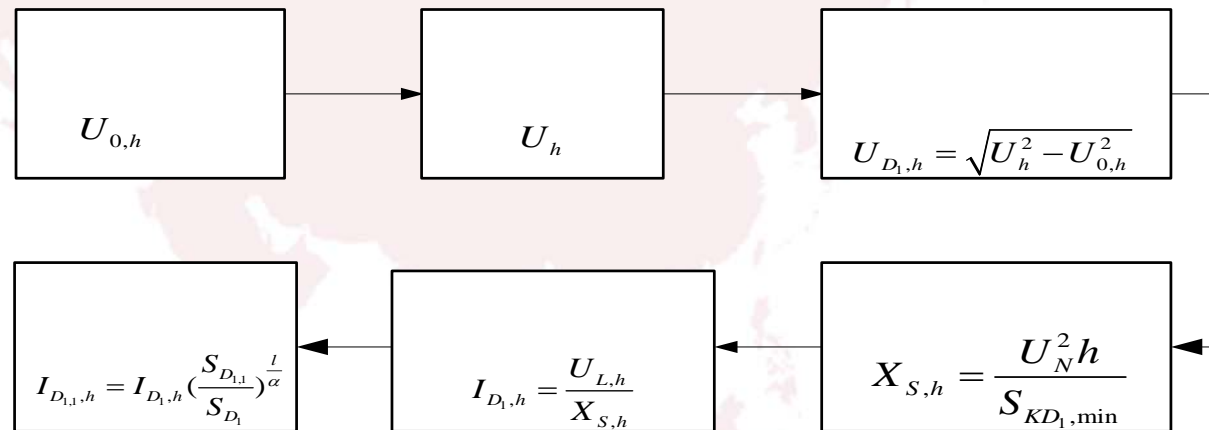


图3 谐波电流发射限值流程

图3中： S_{D1} 为线路协议用电容量， $S_{D1,1}$ 为 $D_{1,1}$ 线路协议用电容量， a 为相位迭加系数。

6. 电能质量限值计算的思考



6.1 电能质量限值计算的主要思路

如何在保证系统安全的情况下，计算电能质量限值，使电能质量管理和控制成本最低，是电能质量限值计算和分配中最重要的问题，解决这个问题的主要思路是：

(1) 公用电网电能质量限值采用GB系列电能质量标准计算，用户配电网电能质量限值采用的GB系列电磁兼容标准计算。因为前者比后者严格，如果后者大都采用110kV或220kV线路供电，则可大幅度减少用户在电能质量管理和控制方面的费用。

(2) 对于电压敏感设备，制造商提高电气设备的电磁兼容水平比起对其特殊提高供电质量的成本要低得多。

(3) 按照市场化原则解决好接于公共电网连接点的各个用户对用电质量指标的分配问题。

国标中是按照公平原则对不同功率用户分配用电质量限值，尽管某几个用户用电质量指标超标，但全部用户的用电质量指标则未超标。这时如果要求超标用户采取治理措施，总体社会成本就会提高。如果按照市场化原则让用电质量高的用户出售干扰限值给用电质量指标超标用户，就不需要投入电能质量治理的成本。

6.2 电能质量指标限值计算是一项十分复杂的技术工作，本文提出的计算思路和方法还存在很多问题，需要在实践中不断地完善。



谢谢!

www.apqi.org

